

TRABAJO DE FIN DE GRADO
UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID



MEDIDA DE EXPANSIÓN MEDIANTE FIBRAS DE BRAGG
PARA APLICACIONES DE GEOPOSICIONAMIENTO

AUTOR: Alberto Zarzuelo García

TUTOR: Guillermo Carpintero del Barrio

FECHA: 13 de octubre 2016

Título: Medida de expansión mediante fibras de bragg para aplicaciones de geoposicionamiento

Autor: Alberto Zarzuelo García

Director: Guillermo Carpintero del Barrio

EL TRIBUNAL

Presidente: Emilio Olías Ruiz

Vocal: Manuel Velasco de Diego

Secretario: Santiago Martínez de la Casa Díaz

Realizado el acto de defensa y lectura del Trabajo Fin de Grado el día 13 de Octubre de 2016 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

AGRADECIMIENTOS

Todo viaje siempre consta de tres etapas: el inicio, el trayecto y el destino. En este punto muy cercano al destino, no está demás echar la vista atrás un momento y agradecer a todas las personas que han hecho esto posible.

Agradecer a mi familia que siempre ha estado ahí para apoyarme, en los buenos y en los malos momentos, cuando me caía para ayudarme a levantarme, cuando más oscuro veía el camino para arrojar luz sobre él, muchas gracias.

Agradecer a mis dos grandes amigos y con los que más cosas he compartido en el transcurso del grado, Alberto Vivar y Víctor Serrano, muchas gracias, sin vosotros el viaje hubiera sido infinitamente más duro

A Antonio, que aunque no haya podido terminar el proyecto con él, el tiempo que estuvimos aprendí mucho y espero que nuestros caminos se vuelvan a cruzar.

A Robinson y a sobretodo a Dani, que han estado conmigo desde el momento en que decidí hacer el proyecto, que me han enseñado, que me han corregido cuando ha sido necesario y que me han ayudado en todo lo que ha estado en su mano siempre sin pedir nada a cambio, muchas gracias a los dos.

A Guillermo que, cuando más negro veía mi futuro y mis expectativas de terminar el grado, apareció como de la nada para ofrecerme una alternativa y otro camino con el que poder llegar al destino, te estaré eternamente agradecido. Mil gracias Guiller.

Y por último mi más sincero agradecimiento a Patricia Ruiz por darme ese empujoncito final que me faltaba con los dos índices, que ya pensaba que no acababa.

En definitiva, muchas gracias a todos.

RESUMEN

El objetivo de este proyecto es caracterizar experimentalmente el uso de redes de Bragg en fibra (Fiber Bragg Grating, FBG), para evaluar su aplicación a la medida de deformación por variaciones ambientales de un bloque de hormigón. Para ello, hemos desarrollado un banco de pruebas de laboratorio, fabricado mediante una serie de piezas de aluminio, que permiten variar independientemente la temperatura y la elongación de la fibra.

En este banco de pruebas, podemos analizar los posibles efectos que puedan aparecer e influir en las medidas para distintas condiciones de deformación, habrá que tener muy en cuenta.

Para la toma de estas medidas hemos diseñado un sistema en el que vamos a inyectar potencia óptica mediante un láser sintonizable en torno a los 1500 nm a través de una FBG y vamos a captar la respuesta, ya sea con el analizador de espectros ópticos o con el medidor de potencia óptica, tanto en transmisión como en reflexión (más adelante explicaremos esto con más detalle).

Una vez tengamos las medidas lo que haremos será caracterizar de algún modo la deformación que se ha producido en el material a través de algún tipo de expresión que nos relacione la deformación con el desplazamiento de la longitud de onda de Bragg.

Una vez tengamos algo parecido a una expresión matemática podremos cuantificar la deformación producida simplemente mirando el desplazamiento de la longitud de onda de Bragg.

Como más adelante explicaremos, no todo va a ser tan sencillo como lo estamos redactando ya que habrá variables que perturben las medidas y tendremos que pensar en algún modo de suprimir sus posibles contribuciones. Como por ejemplo la temperatura o el propio pegado de la fibra.

ABSTRACT

The objective of this project is to experimentally characterize the use of fiber Bragg gratings (Fiber Bragg Grating, FBG), to evaluate its application to measure deformation by environmental variations of a concrete block. To do this, we have developed a laboratory test, manufactured by a series of aluminum parts, which allow independently vary the temperature and fiber elongation.

In this test, we can analyze the possible effects that may appear and influence the measures for different deformation conditions; it should be taken into account.

For taking these measures we have designed a system in which we will inject optical power using a tunable laser around 1500 nm through a FBG and we will grasp the answer, either with the optical spectrum analyzer or the optical power meter, both transmission and reflection (later explain this in more detail).

Once we have measures what we will characterize somehow deformation has occurred in the material through some kind of expression relating us deformation with displacement of the Bragg wavelength.

Once we have something like a mathematical expression we can quantify the deformation produced just watching the movement of the Bragg wavelength.

As will be explained, not everything will be as simple as we are writing because there will be variables that disturb the measurements and we will have to think of some way to suppress their possible contributions. Like for example temperature or bonding of the fiber.

ÍNDICE GENERAL

Capítulo Inicial – Fundamento teórico

¿Qué es una red de Bragg?.....	pág. 11
Funcionamiento.....	pág. 12
Uso como sensor de deformación.....	pág. 12
Uso como sensor de temperatura.....	pág. 13
Ventajas en el uso de redes de Bragg en fibra: la multiplexación.....	pág. 13
¿Cuál es el principio de medición de una red de Bragg en fibra?.....	pág. 14
Dependencia entre la deformación y la red de Bragg en fibra (FBG).....	pág. 14
Dependencia entre la temperatura y la red de Bragg en fibra (FBG).....	pág. 15

Capítulo I – Experimento a realizar y setup experimental

Objetivo del experimento.....	pág. 17
Experimento realizado.....	pág. 19
Fibras disponibles.....	pág. 20
Recubrimiento blanco.....	pág. 20
Recubrimiento amarillo.....	pág. 20
Sin recubrimiento.....	pág. 21
Setup global.....	pág. 21
Formas de medir.....	pág. 22
Primera forma.....	pág. 22
Reflexión.....	pág. 22
Transmisión.....	pág. 22
Medidas en deformación.....	pág. 23
Medidas en temperatura.....	pág. 23
Segunda forma.....	pág. 24
Reflexión.....	pág. 24
Transmisión.....	pág. 24
Medidas en deformación.....	pág. 25
Medidas en temperatura.....	pág. 25
Inconvenientes.....	pág. 26
Primera forma.....	pág. 26
Segunda forma.....	pág. 26
Conclusiones.....	pág. 26

Capítulo II – Control en temperatura

Control en temperatura.....	pág. 28
Primera medida.....	pág. 31
Segunda medida.....	pág. 32
Conclusiones.....	pág. 33
Medida definitiva.....	pág. 34

Capítulo III – Comprobación de las fibras

Curva de ganancia del EDFA (Transmisión) – Zona de amplio espectro...	pág. 37
Curva de ganancia del EDFA (Transmisión) – Zona de trabajo.....	pág. 37
Curva de ganancia del EDFA (Reflexión) – Zona de amplio espectro.....	pág. 38
Curva de ganancia del EDFA (Reflexión) – Zona de trabajo.....	pág. 38
Recubrimiento blanco.....	pág. 39
Reflexión.....	pág. 39
Transmisión.....	pág. 40
Recubrimiento amarillo.....	pág. 40
Reflexión.....	pág. 40
Transmisión.....	pág. 41
Sin recubrimiento.....	pág. 43
Reflexión.....	pág. 43
Transmisión.....	pág. 43

Capítulo IV – Medidas en temperatura

Medidas en temperatura.....	pág. 45
Programación en Matlab.....	pág. 46
Medidas en transmisión.....	pág. 48
Ajuste mínimos cuadrados.....	pág. 50
Medidas en reflexión.....	pág. 53
Ajuste mínimos cuadrados.....	pág. 55
Factores externos al FBG.....	pág. 58

Capítulo V – Pruebas de pegado

Pruebas de pegado.....	pág. 61
Celo 3M.....	pág. 61
Cinta americana.....	pág. 62
Norland Optical Adhesive 61.....	pág. 62
Loctite.....	pág. 63
Conclusiones.....	pág. 64
CONSIDERACIONES.....	pág. 64
Si la fibra se va a dejar fija.....	pág. 64
Si la fibra se va a estar manipulando.....	pág. 64

Capítulo VI – Presupuesto

Thorlabs.....	pág. 65
Oficina Técnica.....	pág. 65

Bibliografía

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1a – Fabricación de una FBG.....	pág. 11
Figura 1b – Parámetros en un FBG.....	pág. 11
Figura 2 – Uso de FBG como sensor de deformación.....	pág. 11
Figura 3 – Uso de FBG como sensor de temperatura.....	pág. 12
Figura 4 – Pilar de hormigón armado sin sensor.....	pág. 17
Figura 5 – Pilar de hormigón armado con sensor.....	pág. 17
Figura 6 – Foto de satélite. Observatorio de Yebes.....	pág. 17
Figura 7 – Setup experimental.....	pág. 19
Figura 8 – Foto detalle setup experimental. Fibra apoyada sujeta con imanes.....	pág. 19
Figura 9 – Datasheet fibra con recubrimiento blanco.....	pág. 20
Figura 10 – Datasheet fibra con recubrimiento amarillo.....	pág. 20
Figura 11 – Datasheet fibra sin recubrimiento.....	pág. 21
Figura 12 – Setup global.....	pág. 21
Figura 13 – Primera forma de medir (reflexión). Diagrama de bloques.....	pág. 22
Figura 14 – Primera forma de medir (transmisión). Diagrama de bloques.....	pág. 22
Figura 15 – Segunda forma de medir (reflexión). Diagrama de bloques.....	pág. 24
Figura 16 – Segunda forma de medir (transmisión). Diagrama de bloques.....	pág. 24
Figura 17 – Controlador de temperatura. ILX Lighwave.....	pág. 28
Figura 18 – Tabla de coeficientes estándar de la ecuación de Steinhart-Hart para termistores.....	pág. 29
Figura 19 – Setup para la calibración de la NTC midiendo con dos polímetros....	pág. 29
Figura 20 – Gráficos de resistencia frente a temperatura.....	pág. 30
Figura 21 – Programa en Matlab para realizar un ajuste mínimos cuadrados.....	pág. 31
Figura 22 – Gráfico de ajuste mínimos cuadrados de primera medida. Resistencia vs. Temperatura y resultados.....	pág. 31
Figura 23 – Gráfico de ajuste mínimos cuadrados de segunda medida. Resistencia vs. Temperatura y resultados.....	pág. 32
Figura 24 – Setup para la calibración de la NTC midiendo con un polímetro y el controlador de temperatura.....	pág. 33
Figura 25 – Gráfico de resistencia frente a temperatura. Medida definitiva.....	pág. 34
Figura 26 – Gráfico de resistencia frente a temperatura en Matlab.....	pág. 34
Figura 26b – A mínimos cuadrados y resultados del ajuste.....	pág. 35
Figura 27 – Curva de ganancia del EDFA (Transmisión) – Zona amplio espectro.....	pág. 37
Figura 28 – Curva de ganancia del EDFA (Transmisión) – Zona de trabajo.....	pág. 37
Figura 29 – Curva de ganancia del EDFA (Reflexión) – Zona de amplio espectro.....	pág. 38
Figura 30 – Curva de ganancia del EDFA (Reflexión) – Zona de trabajo.....	pág. 38
Figura 31 – Datasheet de fibra con recubrimiento blanco y resultados del análisis del espectro en el OSA y en Matlab (Reflexión).....	pág. 39

Figura 32 – Recubrimiento blanco. Resultados del análisis del espectro en el OSA y en Matlab (Transmisión).....	pág. 40
Figura 33 – Datasheet de fibra con recubrimiento amarillo y resultados del análisis del espectro en el OSA y en Matlab (Reflexión).....	pág. 41
Figura 34 – Recubrimiento amarillo. Resultados del análisis del espectro en el OSA y en Matlab (Transmisión).....	pág. 42
Figura 35 – Datasheet de fibra sin recubrimiento y resultados del análisis del espectro en el OSA y en Matlab (Reflexión).....	pág. 43
Figura 36 – Sin recubrimiento. Resultados del análisis del espectro en el OSA y en Matlab (Transmisión).....	pág. 43
Figura 37 – Foto en detalle. Fibra apoyada en superficie de aluminio, sujeta con imanes.....	pág. 45
Figura 38 – Setup global.....	pág. 45
Figura 39 – Código de programación. Variables iniciales.....	pág. 46
Figura 40 – Código de programación. Llenar variables de medidas.....	pág. 46
Figura 41 – Código de programación. Representar gráficos de desplazamiento en temperatura.....	pág. 47
Figura 42 – Código de programación. Buscar ganancia mínima y su longitud de onda.....	pág. 47
Figura 43 – Código de programación. Representar gráfico de relación entre longitud de onda y temperatura.....	pág. 47
Figura 44 – Código de programación. Ajuste mínimos cuadrados.....	pág. 48
Figura 45 – Longitud de onda de Bragg a la temperatura de equilibrio y desplazamiento de la longitud de onda en función de la temperatura. Ciclo 1 (Transmisión).....	pág. 48
Figura 46 – Longitud de onda de Bragg a la temperatura de equilibrio y desplazamiento de la longitud de onda en función de la temperatura. Ciclo 2 (Transmisión).....	pág. 49
Figura 47 – Longitud de onda de Bragg a la temperatura de equilibrio y desplazamiento de la longitud de onda en función de la temperatura. Ciclo 3 (Transmisión).....	pág. 49
Figura 48 – Gráfica desplazamiento de longitud de onda de Bragg en función de la temperatura. Ciclo 1 (Transmisión).....	pág. 50
Figura 49 – Cálculo de coeficientes de la expresión lineal. Ciclo 1 (Transmisión).....	pág. 50
Figura 50 – Gráfica desplazamiento de longitud de onda de Bragg en función de la temperatura. Ciclo 2 (Transmisión).....	pág. 51
Figura 51 – Cálculo de coeficientes de la expresión lineal. Ciclo 2 (Transmisión).....	pág. 52
Figura 52 – Gráfica desplazamiento de longitud de onda de Bragg en función de la temperatura. Ciclo 3 (Transmisión).....	pág. 52
Figura 53 – Cálculo de coeficientes de la expresión lineal. Ciclo 3 (Transmisión).....	pág. 52
Figura 54 – Longitud de onda de Bragg a la temperatura de equilibrio y desplazamiento de la longitud de onda en función de la temperatura. Ciclo 1 (Reflexión).....	pág. 53

Figura 55 – Longitud de onda de Bragg a la temperatura de equilibrio y desplazamiento de la longitud de onda en función de la temperatura. Ciclo 2 (Reflexión).....	pág. 54
Figura 56 – Longitud de onda de Bragg a la temperatura de equilibrio y desplazamiento de la longitud de onda en función de la temperatura. Ciclo 3 (Reflexión).....	pág. 55
Figura 57 – Gráfica desplazamiento de longitud de onda de Bragg en función de la temperatura. Ciclo 1 (Reflexión).....	pág. 55
Figura 58 – Cálculo de coeficientes de la expresión lineal. Ciclo 1 (Reflexión).....	pág. 56
Figura 59 – Gráfica desplazamiento de longitud de onda de Bragg en función de la temperatura. Ciclo 2 (Reflexión).....	pág. 56
Figura 60 – Cálculo de coeficientes de la expresión lineal. Ciclo 2 (Reflexión).....	pág. 56
Figura 61 – Gráfica desplazamiento de longitud de onda de Bragg en función de la temperatura. Ciclo 3 (Reflexión).....	pág. 57
Figura 62 – Cálculo de coeficientes de la expresión lineal. Ciclo 3 (Reflexión).....	pág. 57
Figura 63 – Longitud de onda de Bragg a la temperatura de equilibrio y desplazamiento de la longitud de onda en función de la temperatura. Medidas con hielo (Transmisión).....	pág. 58
Figura 64 – Gráfica desplazamiento de longitud de onda de Bragg en función de la temperatura. Medidas con hielo (Transmisión).....	pág. 59
Figura 65 – Celo 3M.....	pág. 61
Figura 66 – Cinta Americana.....	pág. 62
Figura 67 – Norland Optical Adhesive 61.....	pág. 62
Figura 68 – Loctite.....	pág. 63

CAPITULO INICIAL – FUNDAMENTO TEÓRICO

¿Qué es una red de Bragg en fibra?

Una red de Bragg en fibra (Fiber Bragg Grating, FBG) es una microestructura de unos pocos milímetros de longitud (L_{FBG}) realizada en el núcleo de una fibra óptica (de longitud L_F).

Esta microestructura es una variación periódica del índice de refracción de la fibra. Cada punto de variación del índice

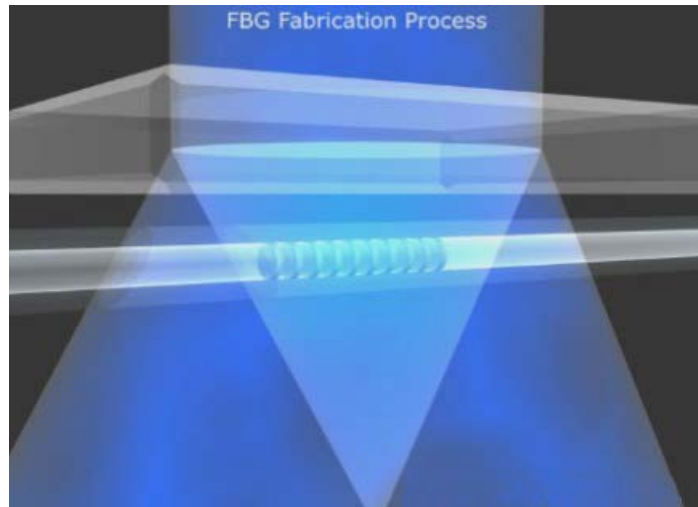


Figura 1a. Fabricación de una FBG

actúa como un espejo, y al tener una variación periódica, su función de transferencia se hace selectiva en frecuencia (y por tanto, también en longitud de onda). Eso significa que si se inyecta en la fibra óptica luz procedente de una fuente de banda ancha, la FBG solo refleja ciertas longitudes de onda, relacionadas con la periodicidad de la microestructura. Esta periodicidad se denomina periodo de la microestructura (Λ), y determina la longitud de onda de la red de Bragg (λ_B) mediante la expresión:

$$\lambda_B = 2 \cdot n_{refr} \cdot \Lambda,$$

En la que el índice de refracción del núcleo es n_{refr} .

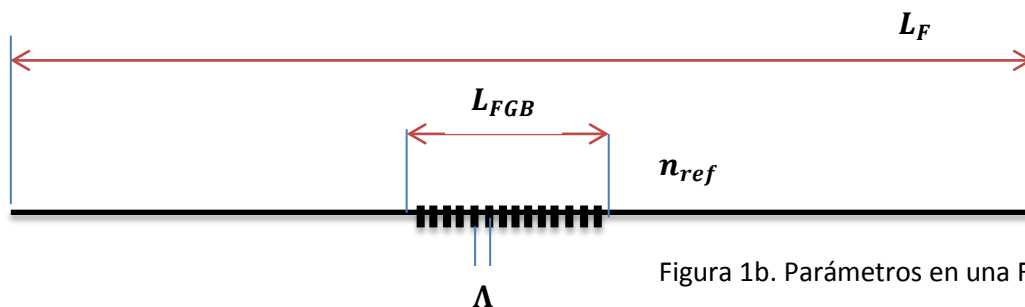


Figura 1b. Parámetros en una FBG

Esta microestructura se genera iluminando de forma transversal la fibra con un haz láser ultravioleta, empleando una máscara de fase para crear un patrón de interferencia en el núcleo de la fibra, lo cual induce un cambio permanente en las características físicas de la matriz de silicio (Figura 1). Este cambio consiste en una modulación periódica espacial del índice de refracción del núcleo, que produce una estructura resonante. El diámetro de la fibra, incluido su recubrimiento primario de protección, es de 250 micras. Sin este recubrimiento, la fibra tiene un diámetro de 125 micras. La luz viaja fundamentalmente a través del núcleo, que tiene un diámetro de unas 8 micras.

Funcionamiento

Al tratarse de una estructura resonante, la red de Bragg inscrita en la fibra actúa como un espejo selectivo en función de la longitud de onda; en otras palabras, es un filtro de banda estrecha. Eso significa que si se inyecta en la fibra óptica luz procedente de una fuente de banda ancha, solo se refleja luz con una anchura espectral muy estrecha, centrada en torno a la longitud de onda de la red de Bragg. El resto de la luz se transmite a través de la fibra óptica sin ninguna pérdida, hasta la siguiente FGB inscrita en la fibra (Figura 2).

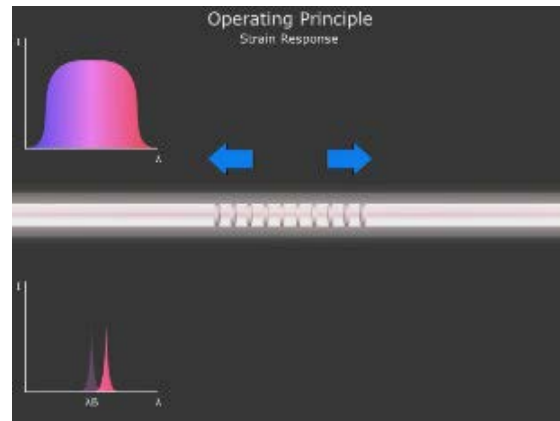


Figura 2. Uso de grating como sensor de deformación

La longitud de onda del FGB viene dada, fundamentalmente, por el periodo de la microestructura y por el índice de refracción del núcleo.

Una FGB es una estructura simétrica: siempre refleja la porción de luz en torno a la longitud de onda de la red, independientemente de la dirección de incidencia.

Uso como sensor de deformación

Una FBG tiene características únicas que permiten utilizarla como sensor. Por ejemplo, si la fibra se estira o se comprime, la red puede medir la deformación. La deformación de la fibra óptica produce un cambio en el periodo de la microestructura y, en consecuencia, también en la longitud de onda de Bragg (Figura 3).

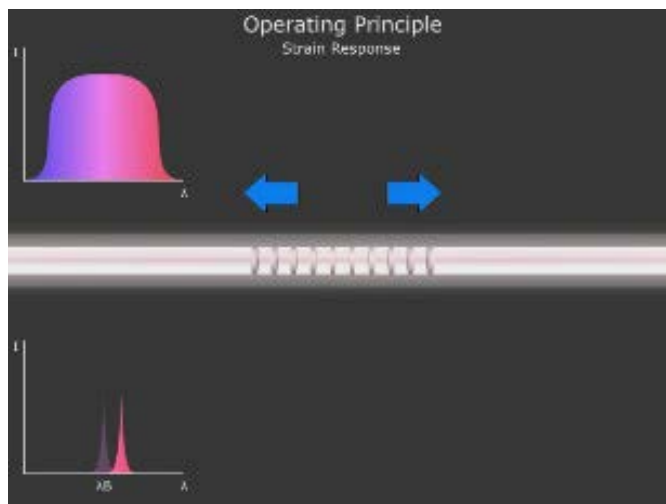


Figura 2. Uso de
FBG como
sensor de
deformación

Uso como sensor de temperatura

Una FBG tiene características únicas que permiten utilizarla como sensor. Por ejemplo, si la fibra se estira o se comprime, la red puede medir la deformación. La deformación de la fibra óptica produce un cambio en el periodo de la microestructura y, en consecuencia, también en la longitud de onda de Bragg (Figura 3).

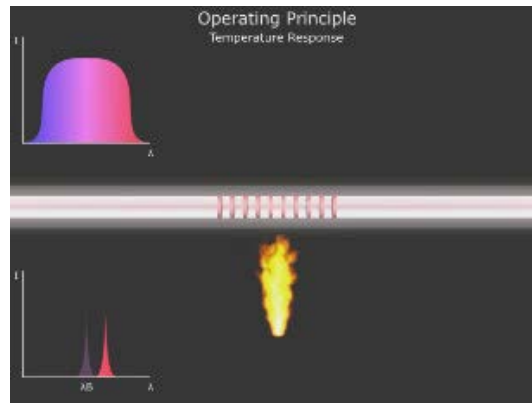


Figura 3. Uso de FBG como sensor de temperatura

(NOTA: en este proyecto vamos a utilizar la red de Bragg únicamente como sensor de deformación, sin embargo habrá que tener el efecto de la temperatura muy presente y será interesante ver cómo, en un futuro, este factor afectará a nuestras medidas, ya que la fibra experimentará la dilatación térmica del material al que se encuentre adherida pero también el calor que le transmita el propio material)

Ventajas en el uso de redes de Bragg en fibra: la multiplexación

Una de las principales ventajas de esta tecnología es su capacidad de multiplexación intrínseca. Es posible inscribir cientos de FBGs en una misma fibra óptica, con separaciones de unos pocos milímetros o de varios kilómetros. Con un acondicionamiento adecuado, cada una de estas estructuras puede hacerse sensible a parámetros distintos de la temperatura o la deformación; por ejemplo, presión, aceleración, desplazamiento, etc., dando una dimensión multifuncional a la serie de sensores.

Conviene insistir en que todos esos sensores pueden activarse con una misma fuente óptica. Por otro lado, la adición de más y más sensores en una misma fibra óptica solo produce pérdidas pequeñas. Tampoco aparecen interferencias, siempre que se reserve para cada sensor un ancho de banda suficiente del espectro de la luz.

¿Cuál es el principio de medición de una red de Bragg en fibra?

Una FBG tiene características únicas que permiten utilizarla como sensor. Por ejemplo, si la fibra se estira o se comprime, la red puede medir la deformación. La deformación de la fibra óptica produce un cambio en el periodo de la microestructura y, en consecuencia, también en la longitud de onda de Bragg. También hay una cierta contribución debida a la variación del índice de refracción, por efecto fotoelástico.

Una FBG tiene, igualmente, una sensibilidad intrínseca a la temperatura. En este caso, la principal contribución al cambio en la longitud de onda de Bragg es la variación en el índice de refracción del silicio, inducido por el efecto termoóptico. También hay una contribución derivada de la dilatación térmica, que altera el periodo de la microestructura. No obstante, este segundo efecto es marginal, debido al bajo coeficiente de dilatación del silicio.

Dependencia entre la deformación y la red de Bragg en fibra (FBG)

La dependencia entre la deformación y la red de Bragg en fibra puede determinarse derivando la longitud de onda:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{\Delta(n_{ef}\Lambda)}{n_{ef}\Lambda} = \left(1 + \frac{1}{n_{ef}} \frac{\partial n_{ef}}{\partial \varepsilon}\right) \Delta\varepsilon = (1 + p_e) \Delta\varepsilon = \beta_\varepsilon \Delta\varepsilon$$

Dónde:

$\Delta\varepsilon$ – Microdeformaciones

β_ε – Sensibilidad a la deformación de la FBG.

p_e – Constante fotoelástica (variación del índice de refracción con la tensión axial)

La constante p_e para la fibra óptica es

$$p_e \approx -0.212$$

Sabiendo que la sensibilidad a la deformación de una FBG viene dada por la expresión:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta\varepsilon} = \beta_\varepsilon \lambda_B = 0.788 \lambda_B$$

Para una FBG @1550 nm, es

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta\varepsilon} = 1.2 \text{ pm}/\mu\varepsilon$$

Dependencia entre la temperatura y la red de Bragg en fibra (FBG)

A semejanza de la dependencia de la deformación, la dependencia de la temperatura con respecto a la FBG puede determinarse derivando la expresión de la longitud de onda (Ecuación 1):

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{\Delta(n_{ef}\Lambda)}{n_{ef}\Lambda} = \left(\frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} + \frac{1}{n_{ef}} \frac{\partial n_{ef}}{\partial T} \right) \Delta T = (\alpha + \zeta) \Delta T = \beta_T \Delta T$$

Dónde:

ΔT – Variación de temperatura

β_T – Sensibilidad térmica de la FBG.

α – Coeficiente de dilatación térmica de la fibra

ζ – Coeficiente termo-óptico (dependencia del índice de refracción con la temperatura)

Como aproximación de la sensibilidad a la temperatura, podemos asumir que estos valores son constantes para el intervalo de temperatura de interés:

$$\alpha = 0.55 \cdot 10^{-6}/^{\circ}C$$

$$\zeta = 5.77 \cdot 10^{-6}/^{\circ}C$$

Con lo cual, la sensibilidad térmica aproximada viene dada por

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = \beta_T \lambda_B = 6.32 \lambda_B$$

Para una FBG @1550 nm, es

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = 9.8 pm/^{\circ}C$$

CAPITULO I – EXPERIMENTO A REALIZAR Y SETUP EXPERIMENTAL

Objetivo del experimento

En el Observatorio de Radioastronomía de Yebes (Guadalajara) se han construido una red de veinte pilares. La función de estos pilares es servir de referencia a sistemas de geolocalización. Para ello, se necesita montar espejos en la parte superior con los que triangular. La posición de estos espejos es absoluta, y necesita determinarse independientemente de las condiciones ambientales.



Figura 4. Pilar de hormigón armado sin sensor



Figura 5. Pilar de hormigón armado con sensor

Estos pilares son de forma cilíndrica y están hechos de hormigón armado, tienen 30 centímetros de diámetro y están recubiertos por un tubo cilíndrico protector. Entre este tubo y el pilar hay una distancia de 5 cm para aislar el interior y tienen una altura de 1,30 metros. La parte superior del tubo exterior está recubierta de una protección metálica para prevenir la entrada de agua y un agujero de drenaje en la parte inferior. La parte superior del cilindro está recubierta de acero inoxidable de 5 mm de grosor y en el centro hay un cilindro metálico de 5/8'' para fijar el sensor.

Estos pilares, en la estación de verano con las altas temperaturas, experimentan una deformación longitudinal debido al calor, modificando así la posición inicial del sensor y por tanto introduciendo un error a la hora de determinar la posición geográfica mencionada previamente.

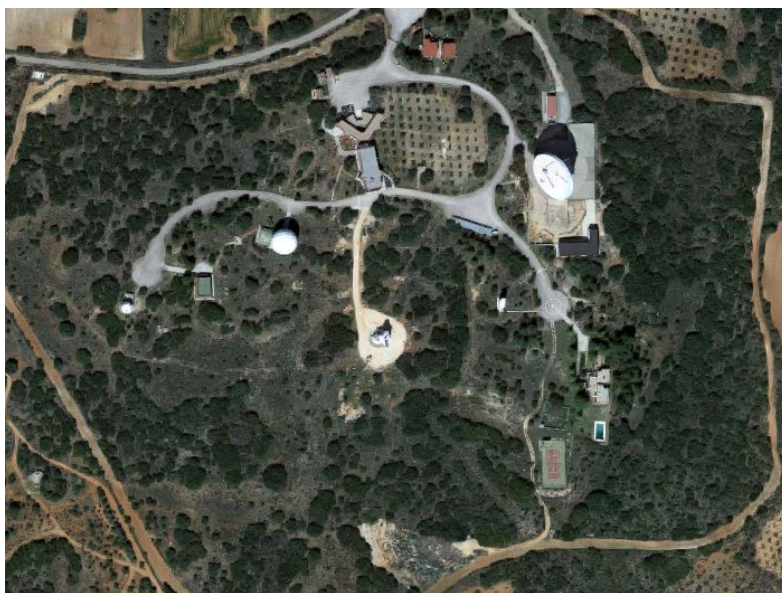


Figura 6. Foto de satélite.
Observatorio de Yebes

Los pilares a su vez están separados a una cierta distancia unos de otros dentro del terreno que comprende el observatorio. Unos se encuentran en zonas descampadas, otros se encuentran situados entre varias arboledas.

De esto podemos pronosticar que la temperatura entre unos y otros no va a ser la misma, ya que no a todos les va a dar el Sol con la misma intensidad, lo cual nos lleva a pensar que la deformación que van a experimentar no va a ser la misma todos.

La idea será colocar FBG en todos los pilares y medir la deformación que experimenta cada uno de ellos, de este modo podremos salir de dudas en el sentido de si todos experimentan la misma deformación o varía en función de donde estén situados. Habrá que tener en cuenta la zona del pilar en la que incide el Sol y la zona donde le da la sombra, por lo que habrá que colocar varias fibras dentro del mismo pilar para tener una medida más precisa del posible gradiente térmico que se pueda generar en el pilar.

Una vez sepamos la deformación que experimentan los sensores podremos enviarle la información para que corregir o eliminar el error introducido.

Experimento realizado

El experimento que vamos a realizar consta de dos partes: la primera se basa en ver el efecto de la temperatura sobre el FBG y cómo va a influir en nuestras medidas en deformación y la segunda se basa en aplicar una deformación longitudinal sobre la fibra mediante el tornillo micrométrico y ver cómo varía la longitud de onda de Bragg.

Para ello hemos montado el siguiente dispositivo:

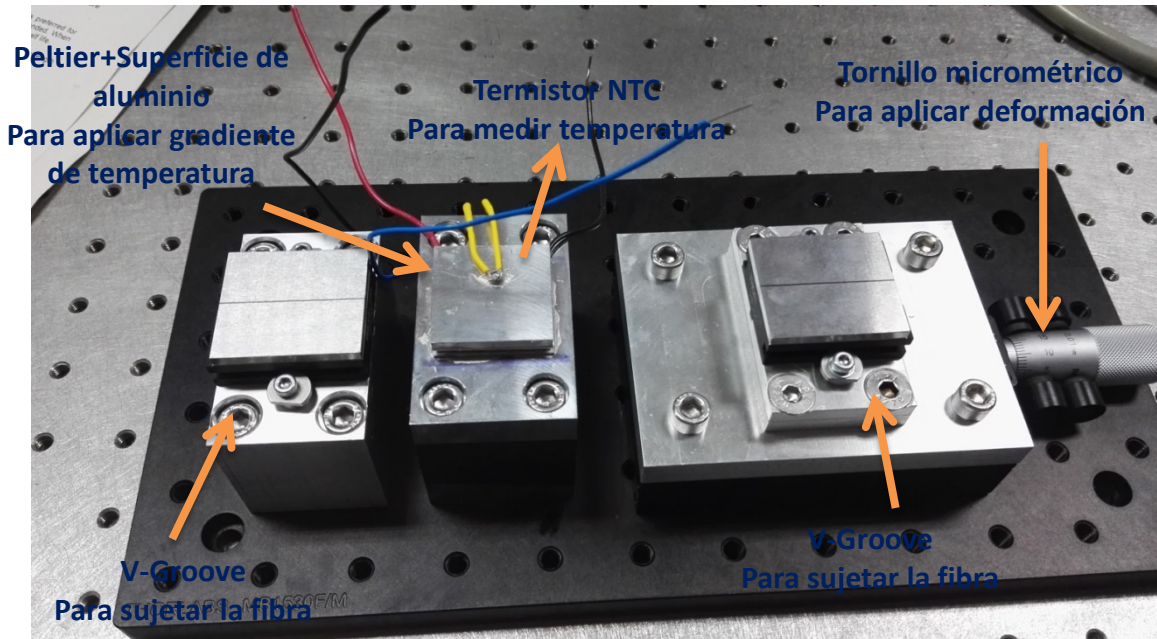


Figura 7. Setup experimental

En la figura 7 se muestra una mesa óptica y encima de ella 7 piezas distribuidas de la siguiente manera:

Una base con tornillo micrométrico con la que vamos a simular la deformación longitudinal de la fibra, y tres piezas de aluminio fabricadas en la oficina técnica. Dos de ellas llevan una hendidura en el centro para acoplar los v-grooves que van a fijar la fibra a nuestro setup y otra central en la que va a ir el peltier y otra pieza de aluminio de su mismo tamaño en la que va a ir apoyada la fibra y el sensor de temperatura.

Las tres piezas alineadas a la misma altura para que la fibra vaya completamente recta.

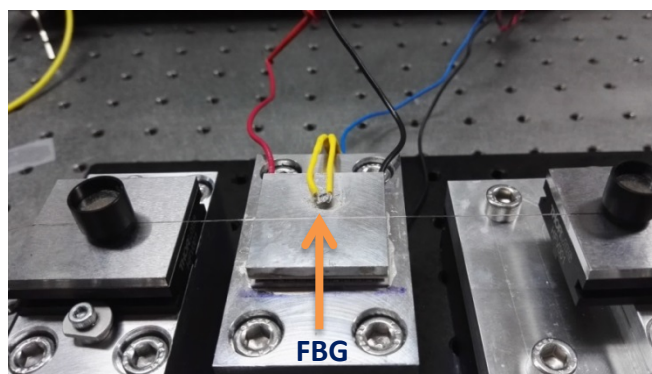


Figura 8. Foto detalle setup experimental. Fibra apoyada y sujeta con imanes

Fibras disponibles

Disponemos de tres fibras con tres longitudes de onda de Bragg situadas en distintos puntos próximos a los 1550 nm, por tanto vamos a realizar un total de 6 experimentos ya que mediremos en deformación y temperatura para cada una de las fibras de las que disponemos.

Para poder distinguirlas vamos a utilizar tres nombres en clave referidos al recubrimiento que lleva cada una de ellas, a saber: recubrimiento blanco, recubrimiento amarillo y sin recubrimiento.

Recubrimiento blanco:

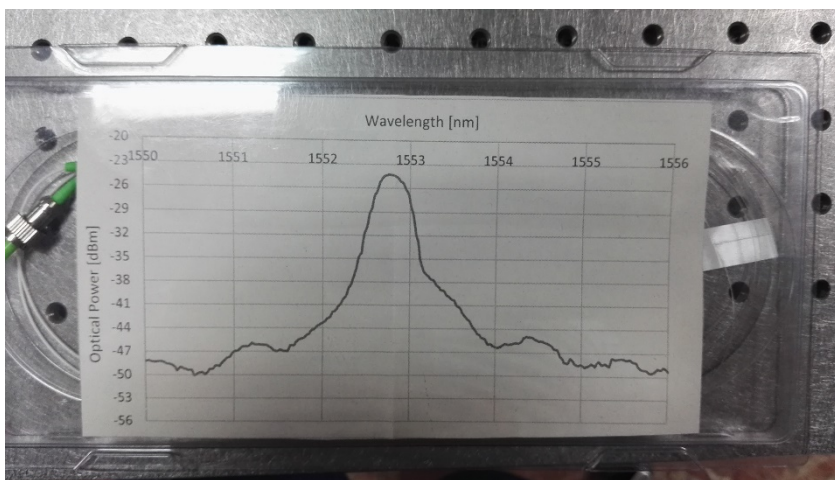


Figura 9. Datasheet fibra con recubrimiento blanco

Recubrimiento amarillo:

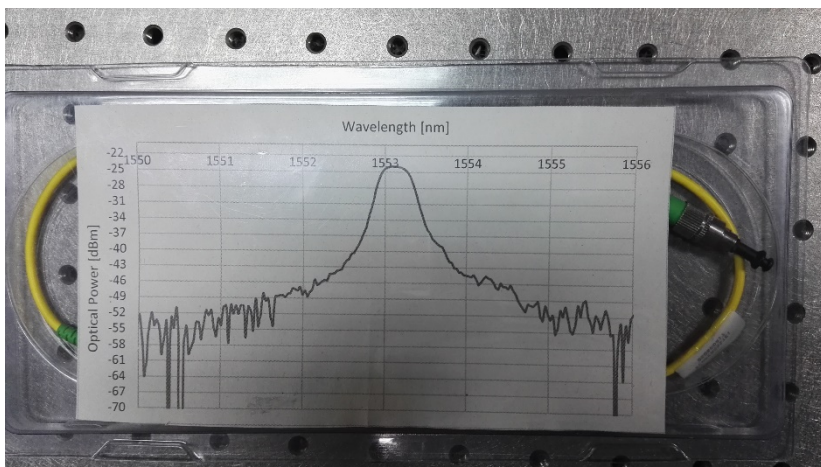


Figura 10. Datasheet fibra con recubrimiento amarillo

Sin recubrimiento:

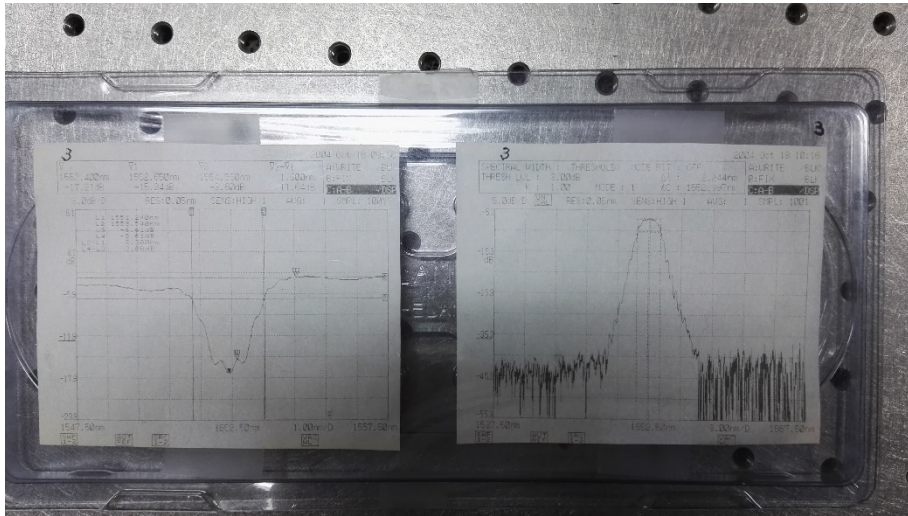


Figura 11. Datasheet fibra con sin recubrimiento

Setup global

Para realizar el experimento lo hemos planteado de dos formas distintas. Vamos a mencionar las dos. Sin embargo, como veremos próximamente solo hemos implementado una de ellas.

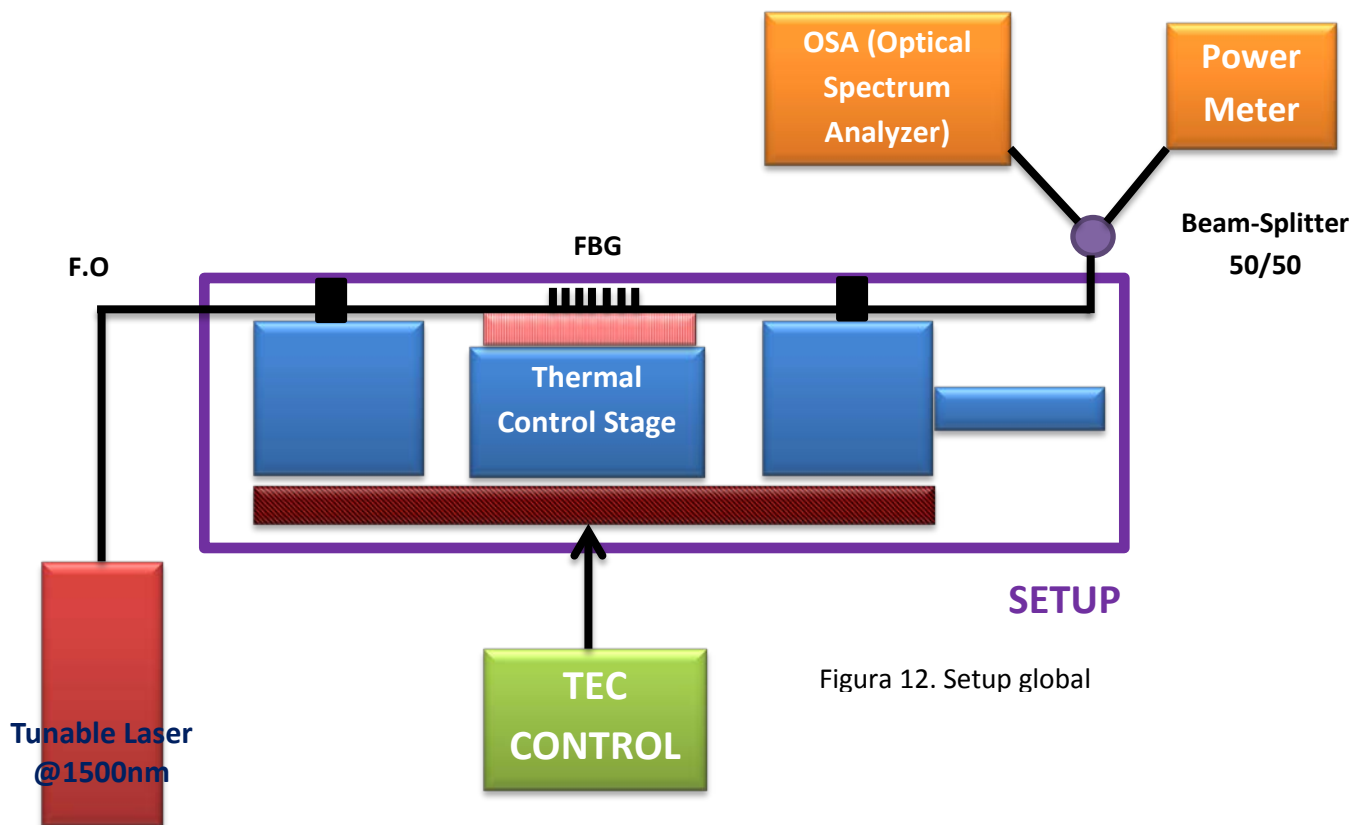


Figura 12. Setup global

En el esquema de la figura 12 mostramos el setup de la figura 7 tal dentro del setup global con el que vamos a realizar las medidas. Se trata de un dispositivo experimental en el que vamos a enviar potencia óptica a través de un láser sintonizable en torno a los 1500 nm. Esta potencia óptica va a pasar por nuestro setup y posteriormente vamos a medir su respuesta, ya sea con el analizador de espectro óptico o con el medidor de potencia óptica.

Formas de medir

Primera forma:

Reflexión

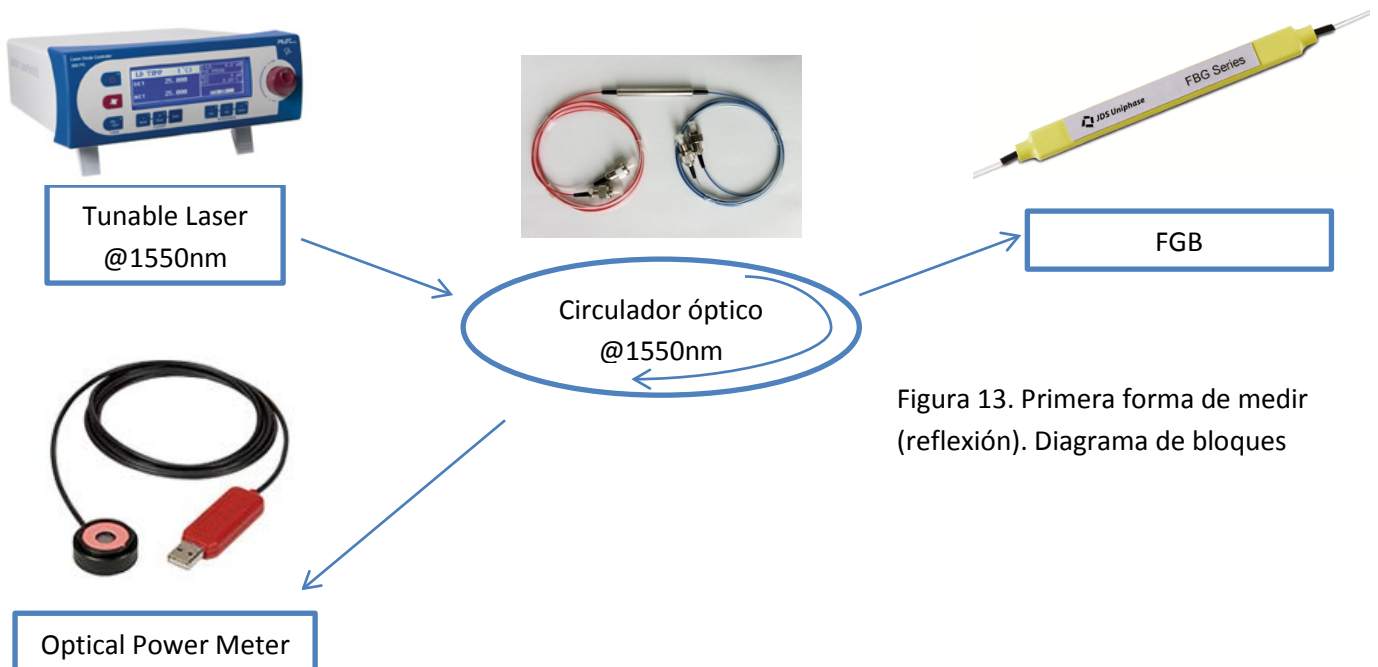


Figura 13. Primera forma de medir (reflexión). Diagrama de bloques

Transmisión



Figura 14. Primera forma de medir (transmisión). Diagrama de bloques

La primera implementación se basa en enviar potencia óptica mediante un láser sintonizable en torno a 1550 nm a través de la fibra y captar esa potencia mediante un medidor de potencia óptico.

Hemos realizado la implementación tanto en transmisión como en reflexión.
(Esta última valiéndonos de un circulador óptico de 1500 nm)

La idea es realizar un control mediante Matlab en el que se haga un barrido de longitudes de onda en un span próximo a la longitud de onda de Bragg y para cada iteración medir la potencia óptica. Una vez recogidas todas las muestras, hacer una representación potencia óptica vs. Longitud de onda en la que veremos, en los dos montajes, donde se refleja o no la luz.

Medidas en deformación:

Realizar el barrido para distintas medidas de deformación longitudinal, mediante el tornillo micrométrico, y comprobar si se desplaza la longitud de onda de Bragg.

Medidas en temperatura:

Realizar el barrido para distintas medidas de temperatura, mediante el peltier controlado con un TE Module, y comprobar si se desplaza la longitud de onda de Bragg.

Segunda forma:

Reflexión

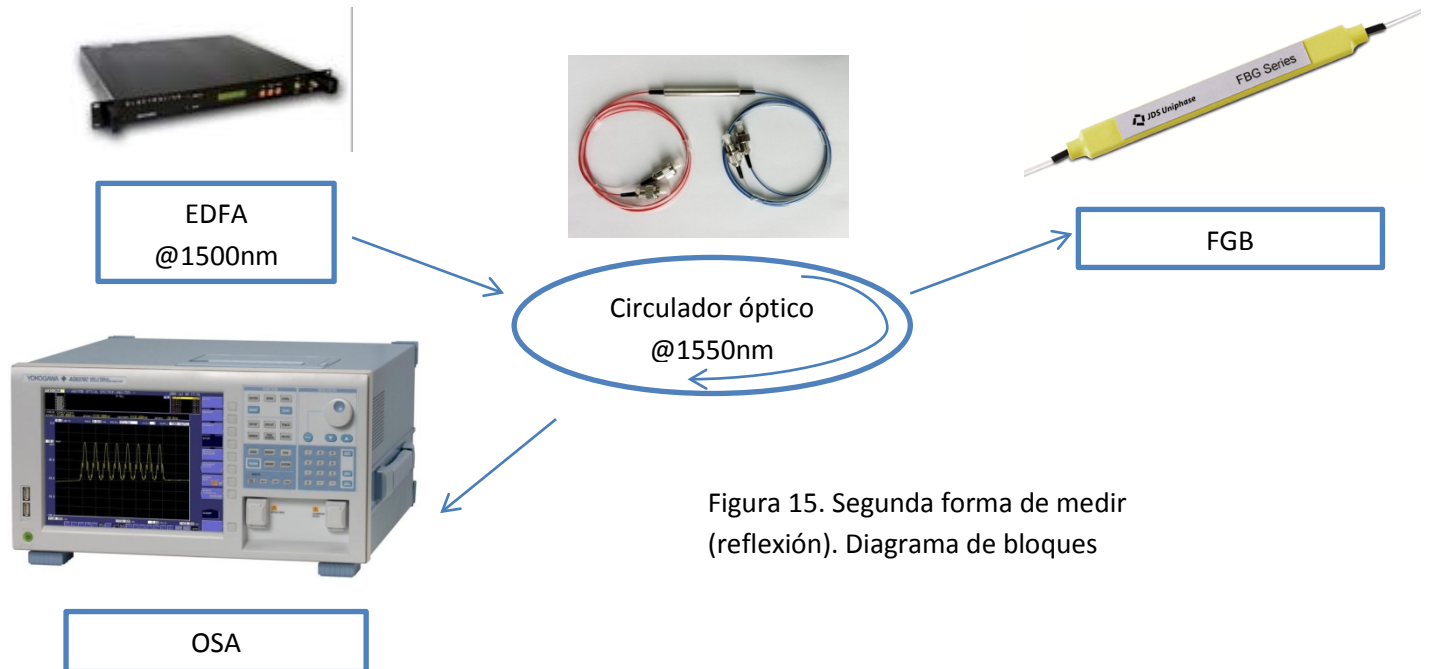


Figura 15. Segunda forma de medir (reflexión). Diagrama de bloques

Transmisión

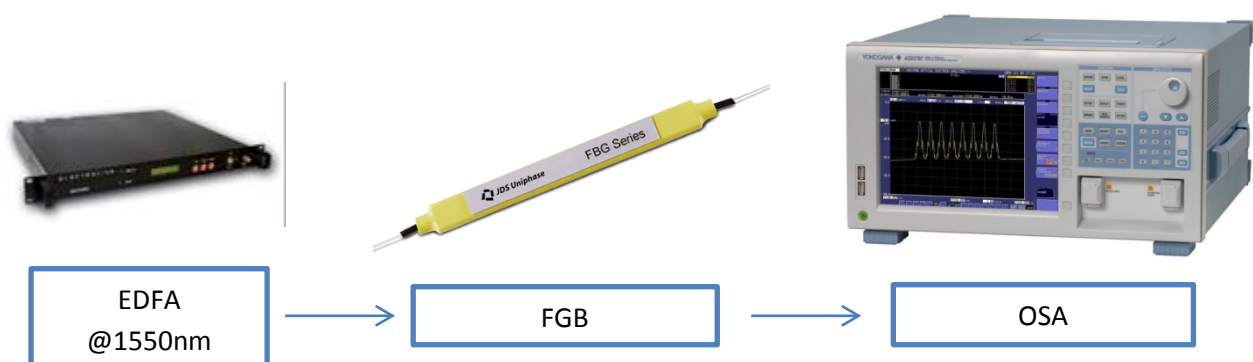


Figura 16. Segunda forma de medir (transmisión). Diagrama de bloques

La segunda implementación se basa en enviar potencia óptica mediante un amplificador de amplio espectro a través de la fibra y medir con un analizador de espectro óptico el espectro en un span en torno a la longitud de onda de Bragg

Hemos realizado la implementación tanto en transmisión como en reflexión.
(Esta última valiéndonos de un circulador óptico de 1500 nm)

La idea es realizar un control mediante Matlab en la que se capturen los datos del espectro óptico que muestra el OSA en un archivo del tipo CSV. Una vez tengamos el archivo simplemente habrá que guardar los datos en dos arrays y representar la potencia óptica vs. Longitud de onda y ver dentro del span muestreado dónde se encuentra la longitud de onda de Bragg

Medidas en deformación:

Capturar los datos del OSA en varios archivos tipo CSV para las distintas medidas de deformación longitudinal, mediante el tornillo micrométrico, representarlas todas en un gráfico y ver si se desplaza la longitud de onda de Bragg

Medidas en temperatura:

Capturar los datos del OSA en varios archivos tipo CSV para las distintas medidas de temperatura, mediante el peltier controlado con un TE Module, y comprobar si se desplaza la longitud de onda de Bragg.

Inconvenientes

Primera forma:

Con esta forma de medir tenemos un gran inconveniente, y es que en el manual de programación del láser sintonizable a 1500 nm no hay comandos para realizar el barrido en longitudes de onda en Matlab. Los comandos que vienen en el manual de programación son únicamente para modificar parámetros como polaridad, intensidad, modo...etc. El control de las longitudes de onda se realiza directamente controlando el motor EPOS2 que tiene el láser y ese control está implementado en Labview.

Esto nos supone un problema ya que el control, tanto del medidor de potencia óptica como el del controlador de temperatura esta hecho en Matlab.

Nos pusimos en contacto con la empresa fabricante del láser y nos dijeron que los ingenieros que tenían trabajando en el desarrollo las librerías para poder controlar el motor con Matlab mediante unas librerías de lenguaje c se fueron de la empresa. La realización de este desarrollo sería bastante complicada y el cambiar todo el control a Labview nos llevaría demasiado tiempo.

Segunda forma:

Con la segunda forma el gran inconveniente es que el rango dinámico del OSA no es muy bueno y no podemos garantizar una respuesta rápida a una variación longitudinal de la fibra debido a una dilatación térmica del material al que está adherida.

Por otro lado el presupuesto de esta implementación es mucho mayor que el de la primera, ya que el conjunto láser + fibra + medidor de potencia óptica + circulador ronda en torno a los 10000 € mientras que en el experimento 2, únicamente, el analizador de espectro óptico ya está por encima de los 25000€

Conclusiones

En este proyecto vamos a realizarlo de la segunda forma ya que solo queremos comprobar si obtenemos una respuesta a una variación de cualquiera de los dos tipos y no tenemos mucho en cuenta el rango dinámico, pero para una futura implementación lo realizaremos de la primera forma ya que la respuesta dinámica es muy buena y el presupuesto es bastante más reducido y dispondremos de más tiempo para realizar todo del desarrollo en Labview.

CAPITULO II – CONTROL DE TEMPERATURA

Control en temperatura

Como nuestro experimento lleva un proceso de calentamiento de las fibras tenemos que conocer la temperatura de la superficie en la que va a ir apoyada la FBG. Vamos a realizar este control mediante un ILX Lightwave provisto de un TE Module y con capacidad para trabajar con tres tipos de sensores térmicos; a saber: Thermistor NTC, Resistencia RTD o LM55.

Hemos escogido este modelo porque nos da la posibilidad tanto de realizar la calibración del sensor como de controlar el voltaje y la intensidad que le estamos enviando al peltier de forma remota mediante comunicación en paralelo GPIB.



Figura 17. Controlador de temperatura. ILX Lightwave

En nuestro caso hemos escogido un **termistor** como sensor de temperatura, por el amplio rango de temperaturas que abarca y su alta sensibilidad. En concreto uno de 10 KOhms.

Para una buena calibración del termistor, el aparato nos pide que introduzcamos los tres coeficientes siguiendo la ecuación de Steinhart-Hart para dicho termistor que nos va a permitir caracterizar su curva y el valor de reposo de la resistencia medida con un multímetro que ajustará la curva a ese valor.

Ecuación de Steinhart-Hart

$$\frac{1}{T} = A + B \ln(R) + C [\ln(R)]^3$$

Dónde:

T es la temperatura (en Kelvins)

R es la resistencia en función de la T (en ohmios)

A, **B** y **C** son los coeficientes de Steinhart-Hart que varían dependiendo del modelo de termistor elegido y del rango de temperatura en el que estamos trabajando

Si observamos el datasheet del aparato vemos que el fabricante nos proporciona una tabla con unos coeficientes estándar para termistores típicos (Figura 18).

Manufacturer and Type			C1	C2	C3
Fenwal	3K @ 25C	Curve 1	1.557	2.162	1.259
Fenwal	5K @ 25C	Curve 1	1.448	2.152	1.165
Fenwal	10K @ 25C	Curve 1	1.302	2.137	1.058
Fenwal	3K @ 25C	Curve 10A	1.089	2.712	1.812
Fenwal	5K @ 25C	Curve 10A	0.957	2.690	1.707
Fenwal	10K @ 25C	Curve 10A	0.780	2.660	1.582
Fenwal	3K @ 25C	Curve 16	1.405	2.369	1.006
Fenwal	5K @ 25C	Curve 16	1.286	2.360	0.939
Fenwal	10K @ 25C	Curve 16	1.126	2.346	0.861
Fenwal	3K @ 25C	Curve 17	0.999	2.807	2.091
Fenwal	5K @ 25C	Curve 17	0.864	2.780	1.977
Fenwal	10K @ 25C	Curve 17	0.685	2.742	1.840
Fenwal	3K @ 25C	Curve 18	1.436	2.289	1.657
Fenwal	5K @ 25C	Curve 18	1.324	2.271	1.553
Fenwal	10K @ 25C	Curve 18	1.174	2.246	1.432
Dale	2K @ 25C	Curve 1	1.500	2.377	1.067
Dale	3K @ 25C	Curve 1	1.405	2.369	1.006
Dale	4K @ 25C	Curve 1	1.338	2.364	0.968
Dale	5K @ 25C	Curve 1	1.286	2.360	0.939
Dale	6K @ 25C	Curve 1	1.244	2.356	0.918
Dale	7K @ 25C	Curve 1	1.208	2.353	0.900
Dale	8K @ 25C	Curve 1	1.177	2.351	0.885
Dale	9K @ 25C	Curve 1	1.150	2.348	0.872
Dale	10K @ 25C	Curve 1	1.126	2.346	0.861
Dale	2K @ 25C	Curve 2	1.259	2.669	1.509
Dale	5K @ 25C	Curve 2	1.024	2.638	1.349
Dale	10K @ 25C	Curve 2	0.848	2.615	1.248
Dale	10K @ 25C	Curve 9	1.031	2.388	1.576
Dale	2.252K @ 25C	Curve 1	1.472	2.375	1.048
Spectra Diode Labs Modules			0.848	2.615	1.248
Lasertron Modules			1.126	2.346	0.861
General Optonics Modules			1.126	2.346	0.861

Figura 18. Tabla de coeficientes estándar de la ecuación de Steinhart-Hart para termistores

Sin embargo utilizando los coeficientes típicos el valor de la temperatura que muestra el display del ILX Lightwave presenta un error de unos $\pm 5^{\circ}\text{C}$ respecto a la sonda de temperatura con la que estamos comparándolo cuanto te mueves por los extremos del rango de temperatura en el que estamos trabajando.

Por lo tanto para una mayor precisión vamos a realizar nuestra propia calibración del termistor y a calcular los coeficientes mediante un ajuste de mínimos cuadrados.

Calibración de la NTC

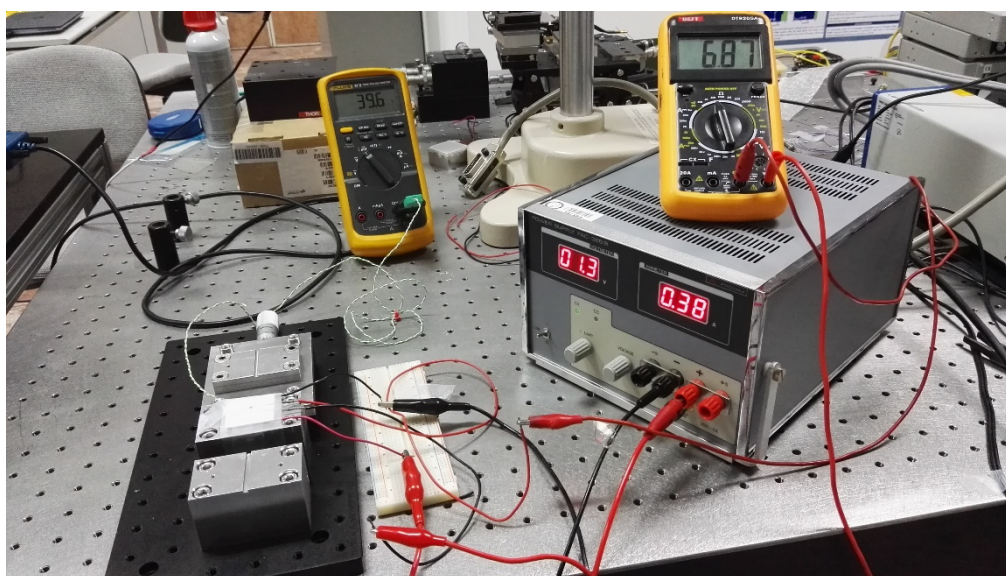


Figura 19. Setup para la calibración de la NTC midiendo con dos polímetros

En el setup mostrado en la figura 19 lo que estamos haciendo es dar corriente al peltier mediante la fuente de tensión. En el peltier hemos pegado tanto la NTC como la sonda de temperatura utilizando una grasilla térmica y presionándolo con celo para mayor adherencia.

En la figura 19 aparecen dos multímetros, en uno estamos midiendo el valor de la resistencia del termistor y en el otro la temperatura que marca la sonda adherida al peltier

Cuando el peltier este polarizado de forma positiva lo que hará será bombear calor hacia arriba y calentar la superficie superior en función de la corriente que le suministremos, y cuando lo polaricemos a la inversa lo que hará será bombear el calor hacia abajo enfriando la superficie superior.

Para una mayor precisión hemos realizado varias medidas de la resistencia en función de la temperatura en el rango de trabajo

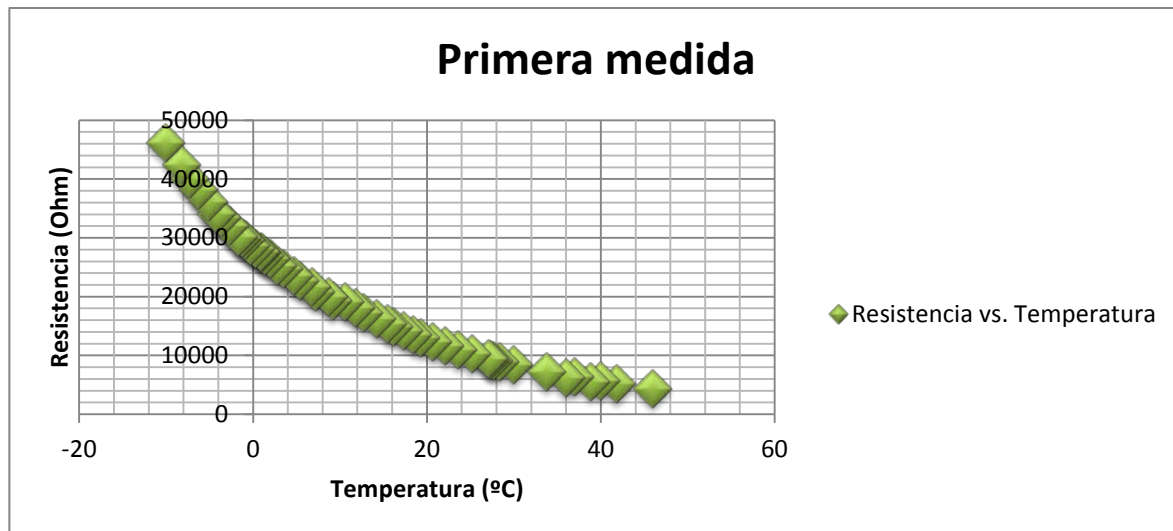
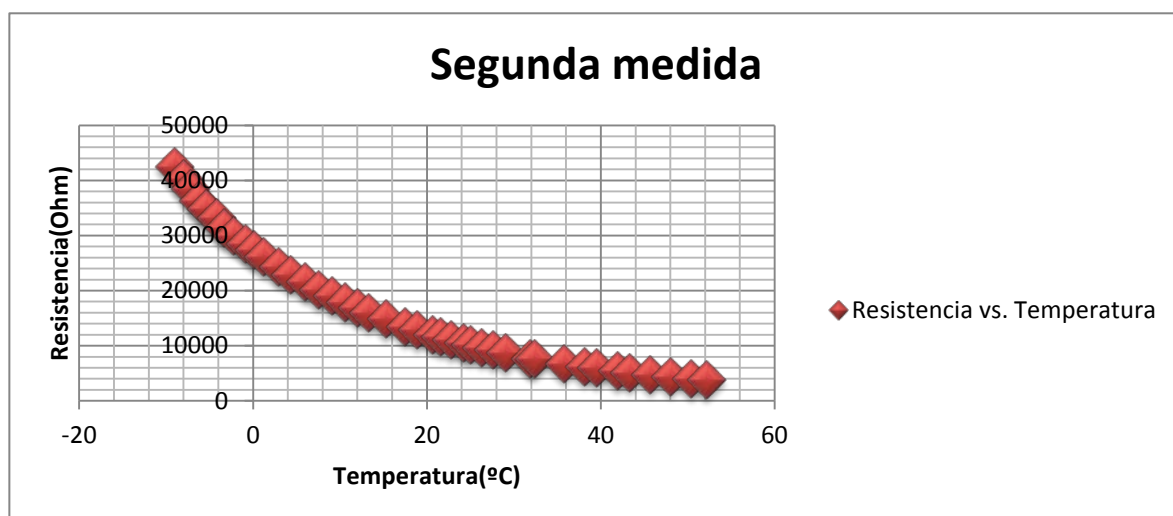


Figura 20. Gráficos de resistencia frente a temperatura



Una vez tenemos los valores medidos vamos realizar un ajuste mínimos cuadrados con Matlab en el que definiremos un modelo con la ecuación de Steinhart-Hart y mediante un comando llamado 'fit' le pediremos que nos haga un ajuste entre los valores medidos y el modelo.

Pondremos como valores iniciales los coeficientes estándar proporcionados por el fabricante ya que son una buena aproximación a lo que nos tiene que salir

```
% Ajuste mínimos cuadrados de los datos medidos de la NTC
data = xlsread('Datos_NTC');
temperatura = data(:,2);
resistencia = data(:,3);
plot(temperatura,resistencia,'s','LineWidth',2,'Color','r');
title('Resistencia vs. Temperatura');
xlabel('Temperatura(K)');
ylabel('Resistencia(Ohm)');
grid minor;

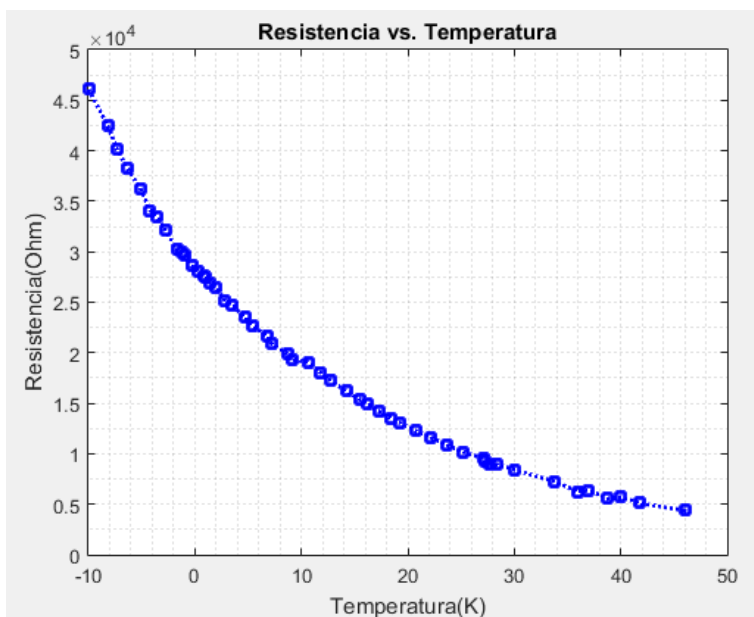
% Importar datos de archivo .xls
x = data(:,3);
y = data(:,1);

% Modelo con la ecuación de Steinhart-Hart
f = fittype('1/(A + B*log(x)+C*log(x).^3)')...
    , 'coefficients',{'A','B','C'});

% Ajuste
t = fit(x,y,f,'StartPoint',[1.2E-03,2.35E-04,0.85E-07]);
display(t);
```

Figura 21. Programa en Matlab para realizar un ajuste mínimos cuadrados

Primera medida

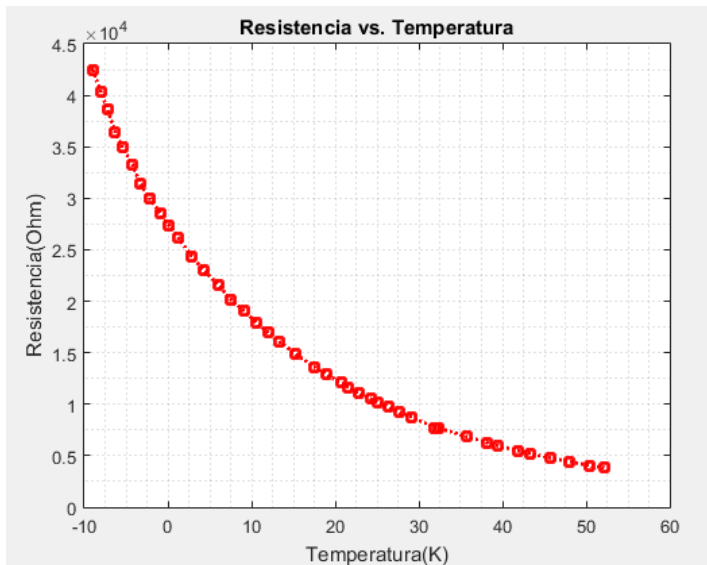


t =

```
General model:
t(x) = 1/(A + B*log(x)+C*log(x).^3)
Coefficients (with 95% confidence bounds):
A = 0.001936 (0.00169, 0.002182)
B = 9.335e-05 (5.448e-05, 0.0001322)
C = 7.086e-07 (5.66e-07, 8.511e-07)
```

Figura 22. Gráfico de ajuste mínimos cuadrados de primera medida. Resistencia vs. Temperatura y resultados

Segunda medida



$t =$

General model:

$$t(x) = 1 / (A + B \cdot \log(x) + C \cdot \log(x)^3)$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$A = 0.001116 \quad (0.001001, 0.00123)$$

$$B = 0.0002161 \quad (0.0001978, 0.0002344)$$

$$C = 3.134e-07 \quad (2.444e-07, 3.823e-07)$$

Figura 23. Gráfico de ajuste mínimos cuadrados de segunda medida. Resistencia vs. Temperatura y resultados

El ILX Lightwave pone por defecto los siguientes órdenes de magnitud, para la primera medida serán:

$$A \rightarrow \cdot 10^{-3}$$

$$B \rightarrow \cdot 10^{-4} \quad \text{Por tanto los coeficientes serán}$$

$$C \rightarrow \cdot 10^{-7}$$

$$A = 1.93$$

$$B = 0.93$$

$$C = 7.08$$

Y para la segunda medida serán:

$$A \rightarrow \cdot 10^{-3}$$

$$B \rightarrow \cdot 10^{-4} \quad \text{Por tanto los coeficientes serán}$$

$$C \rightarrow \cdot 10^{-7}$$

$$A = 1.13$$

$$B = 2.16$$

$$C = 3.13$$

Medimos el valor de resistencia a la temperatura ambiente, le damos esos coeficientes y realizamos una prueba para ver si está midiendo correctamente haciendo medida en temperatura tanto con el ILX Lightwave como con la sonda de temperatura.

Al realizar una prueba en el rango de medida introduciendo los coeficientes de los dos ajustes observamos que los coeficientes calculados para la segunda medida son más precisos los calculados para la segunda ya que la diferencia entre ellos de menor a 0.5°C

en temperaturas cercanas a la temperatura de equilibrio y de $\pm 4^{\circ}\text{C}$ en los extremos, mientras que en el otro cubre bien la temperatura en un rango en torno a la temperatura de equilibrio pero en los extremos la diferencia es de $\pm 10^{\circ}\text{C}$.

Ninguno de los coeficientes calculados en las dos medidas satisface nuestras especificaciones por tanto hemos decidido realizarlo de otra manera distinta:

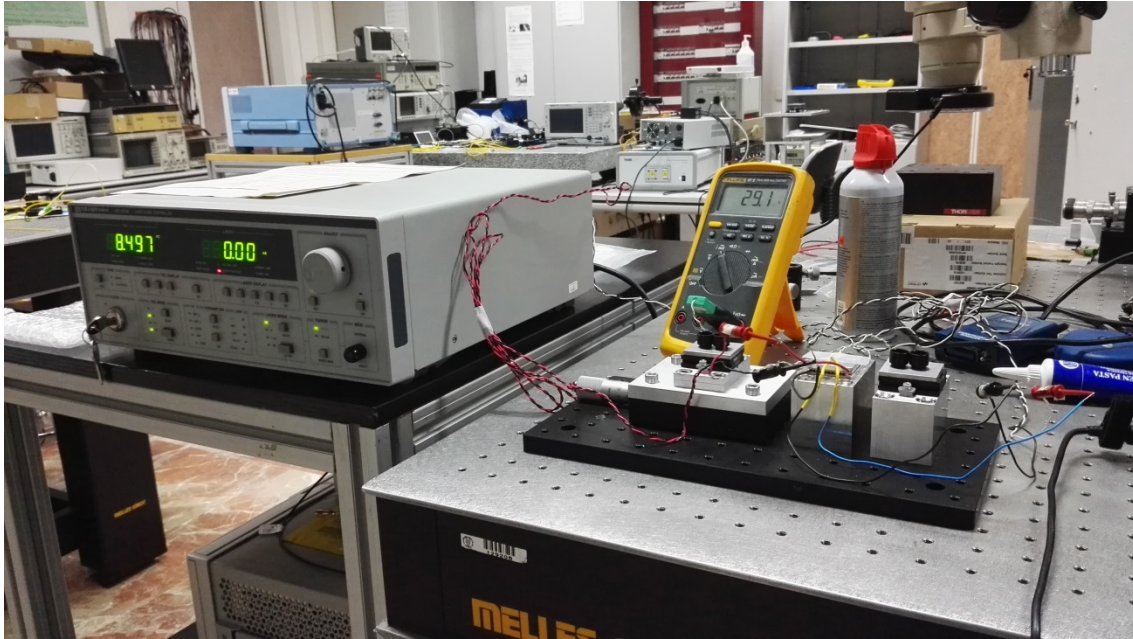


Figura 24. Setup para la calibración de la NTC midiendo con un polímetro y el controlador de temperatura

Conclusiones

Como el valor de la resistencia lo va a medir el ILX Lightwave para realizar su algoritmo interno de temperatura, vamos a medir la resistencia directamente desde él mismo. Modificamos el valor de resistencia y esperamos a que su regulador PI interno ajuste a dicho valor mientras observamos la temperatura a la que se equilibre con el termopar.

De este modo tanto los valores como el ajuste nos quedarán más precisos y reduciremos el error al mínimo para obtener valor más acertado de desplazamiento por grado posible.

Medida definitiva

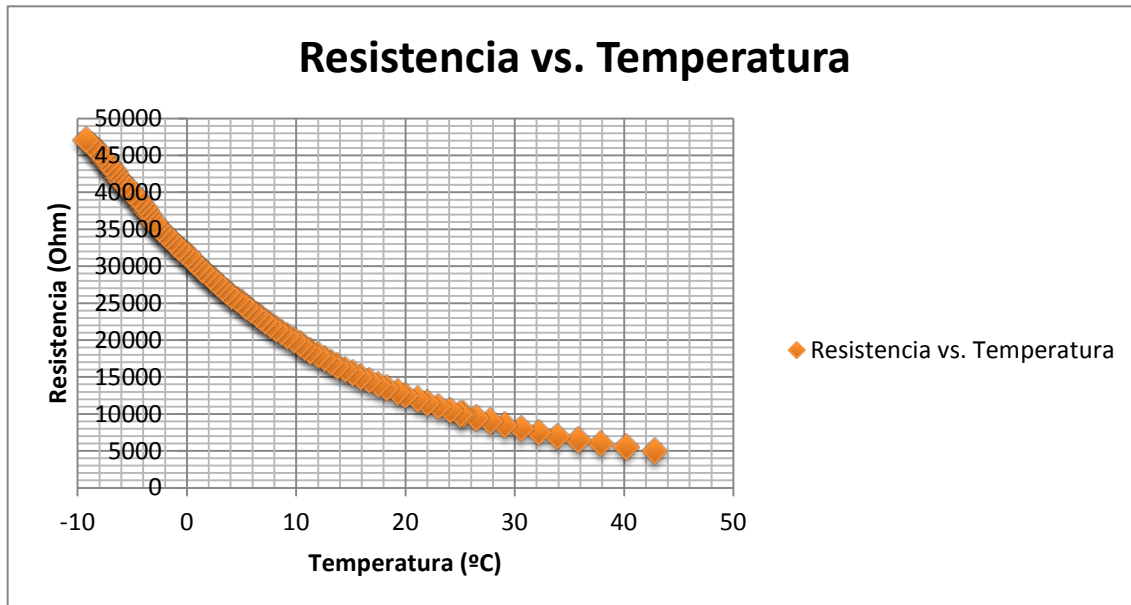


Figura 25. Gráficos de resistencia frente a temperatura. Medida definitiva

Realizándolo de esta manera nos queda la exponencial mostrada en la figura 25, y si realizamos un ajuste mínimos cuadrados valiéndonos de Matlab como en los anteriores casos obtenemos lo siguiente:

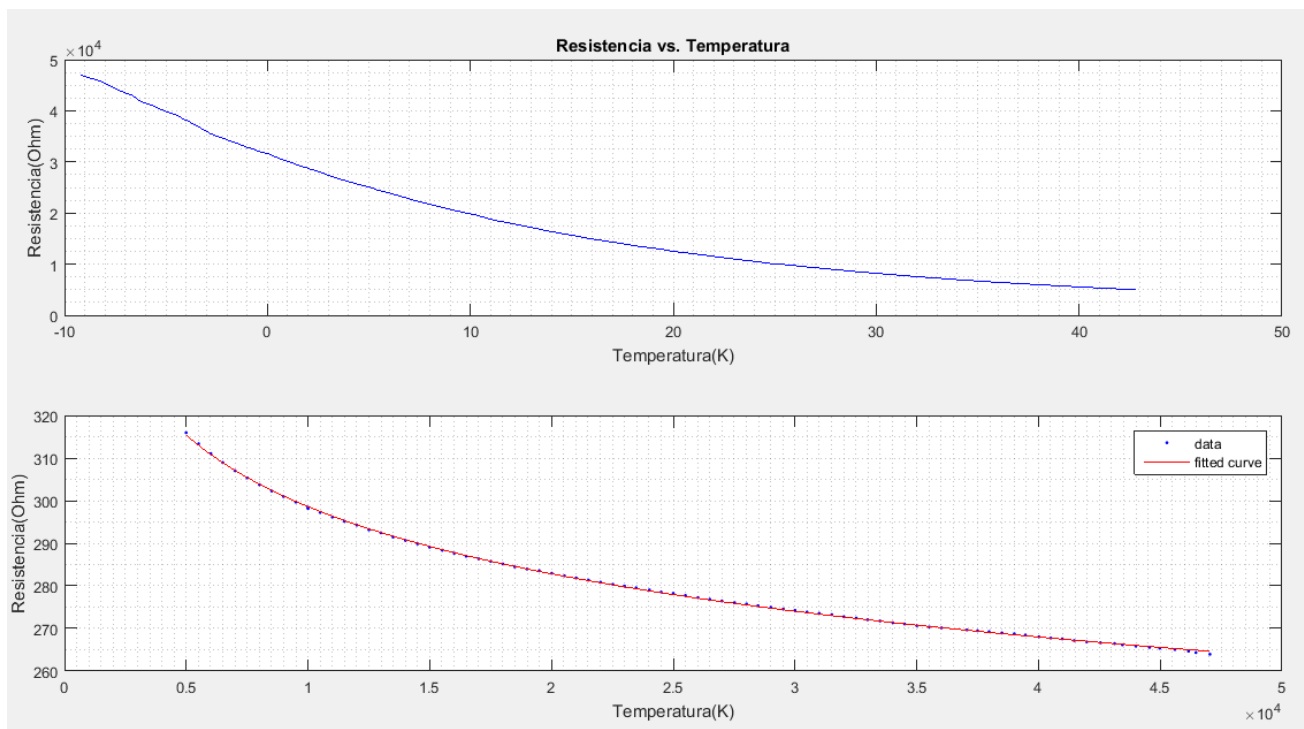


Figura 26. Gráficos de resistencia frente a temperatura en Matlab

$t =$

General model:

$t(x) = 1/(A + B \cdot \log(x) + C \cdot \log(x)^3)$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

A = 0.001422 (0.001326, 0.001518)

B = 0.0001823 (0.0001674, 0.0001971)

C = 3.177e-07 (2.654e-07, 3.701e-07)

Figura 26b. A mínimos cuadrados y resultados del ajuste

Como podemos observar los coeficientes de esta nueva prueba también salen muy parecidos a los coeficientes estándar de una NTC de 10k, como en los anteriores casos, solo que esta vez son más precisos ya que cubren todo el rango de temperaturas con un error menor al 0,5°C en temperaturas próximas a la temperatura de equilibrio y de $\pm 1^\circ\text{C}$ en los extremos.

$$A = 1.42$$

$$B = 1.82$$

$$C = 3.17$$

CAPITULO III – COMPROBACIÓN DE LAS FIBRAS

Comprobación de las fibras

Antes de realizar las medidas en deformación y temperatura vamos a realizar una comprobación de las fibras sin tensión ni temperatura para comprobar que las FGB no están deterioradas y que obtenemos de respuesta algo parecido a lo que nos proporciona la hoja de características.

En primer lugar vamos a medir el espectro óptico del EDFA en transmisión con una fibra normal para luego poder comprobar las posibles pérdidas o el deterioro. Y también vamos a medir el espectro óptico en reflexión con el circulador para comprobar también las posibles pérdidas y que no tengamos ninguna reflexión en la zona de trabajo.

Curva de ganancia del EDFA (Transmisión) – Zona amplio espectro



Figura 27. Curva de ganancia del EDFA (Transmisión) – Zona amplio espectro

Curva de ganancia del EDFA (Transmisión) – Zona de trabajo



Figura 28. Curva de ganancia del EDFA (Transmisión) – Zona de trabajo

Como podemos comprobar en la zona de trabajo tenemos alrededor de -40 dBm, por tanto cuando probemos las fibras tendremos que rondar ese valor

Curva de ganancia del EDFA (Reflexión) – Zona de amplio espectro

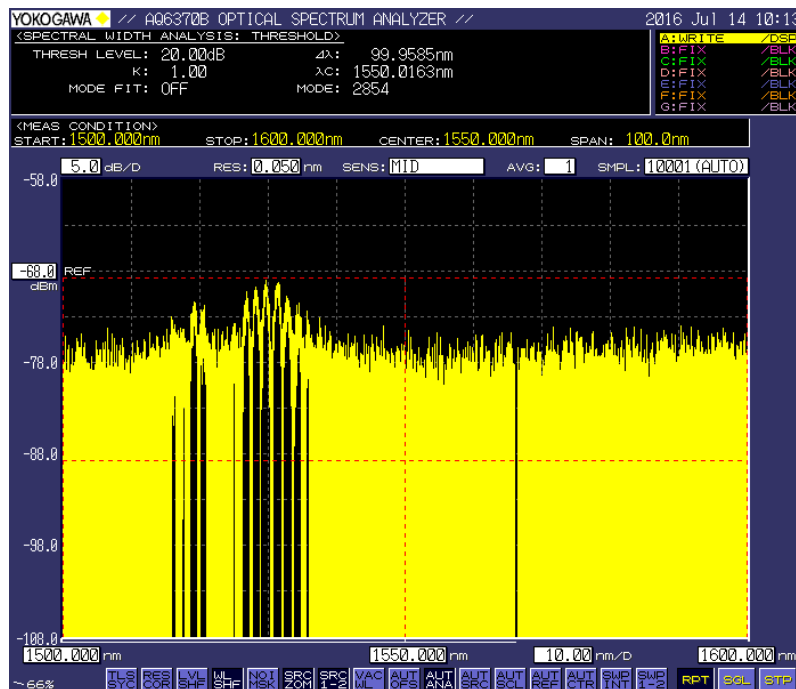


Figura 29. Curva de ganancia del EDFA (Reflexión) – Zona de amplio espectro

Curva de ganancia del EDFA (Reflexión) – Zona de trabajo

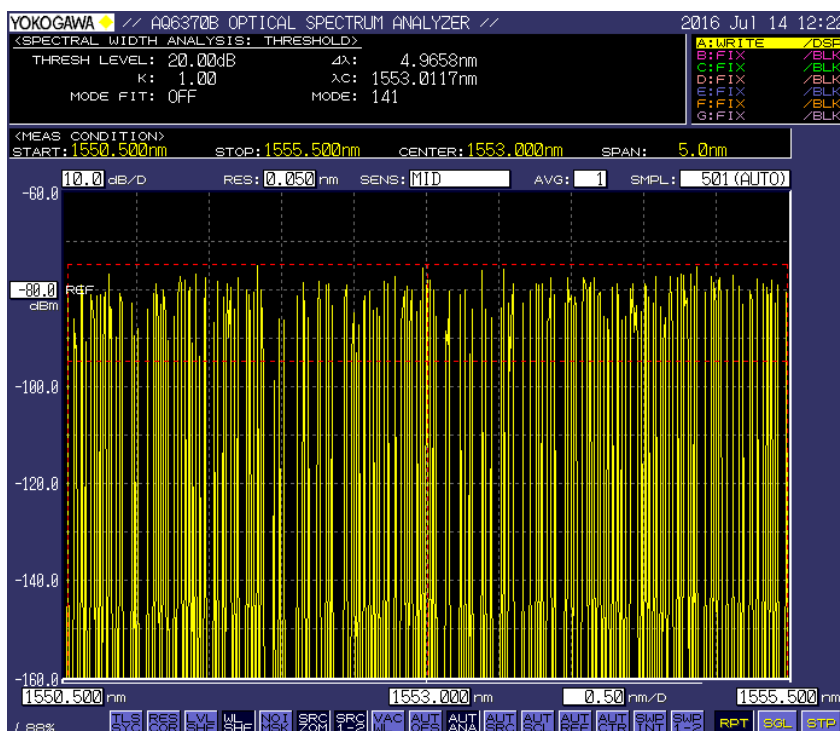


Figura 30. Curva de ganancia del EDFA (Reflexión) – Zona de trabajo

Como podemos observar en la figura 29 donde se muestra un amplio espectro el circulador tiene una zona en la que hay varias reflexiones pero están fuera de nuestra zona de trabajo como se muestra en la figura 30. Por tanto no debería de haber nada que perturbase nuestras medidas.

Recubrimiento blanco:

Reflexión

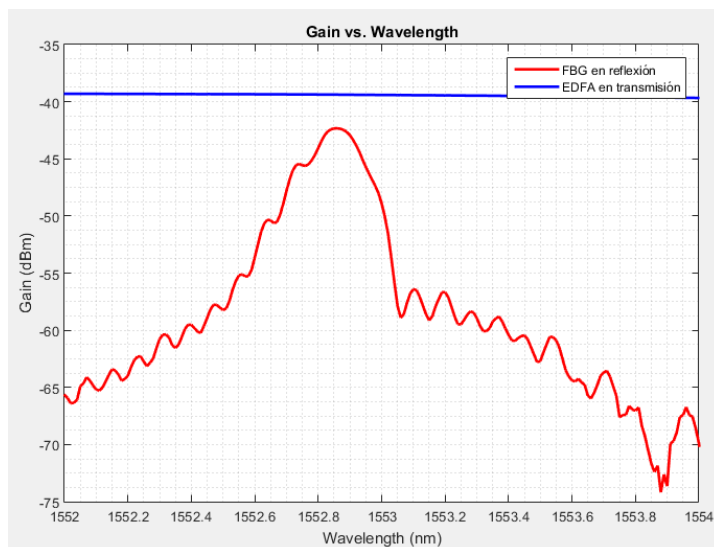
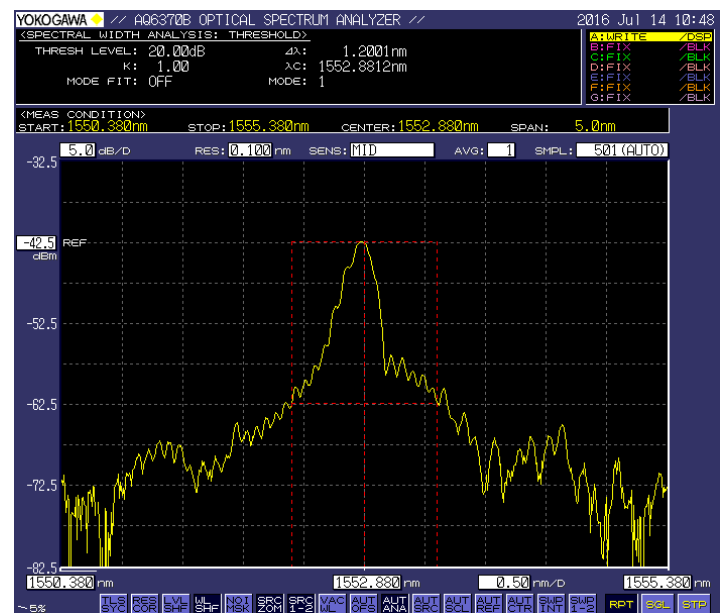
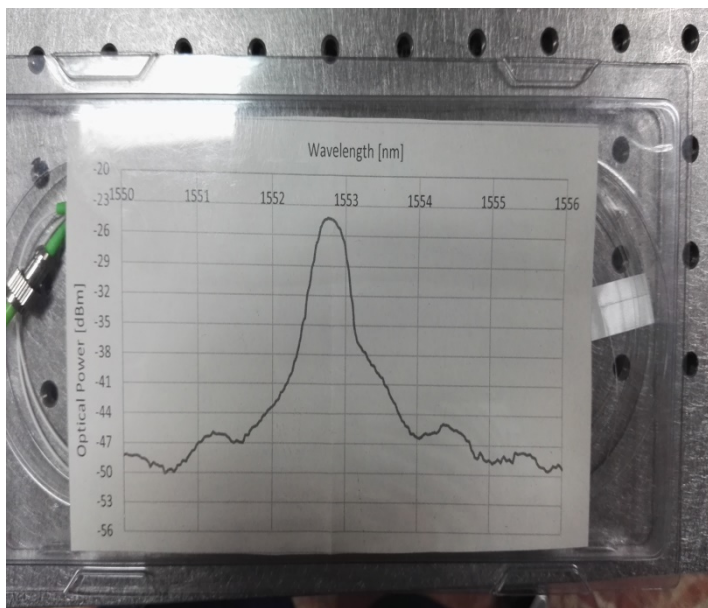


Figura 31. Datasheet de fibra con recubrimiento blanco y resultados del análisis del espectro en el OSA y en Matlab (Reflexión)

En la figura tal mostramos una comparativa representada en Matlab de los espectros en transmisión del EDFA y en reflexión del FBG. Como podemos observar las pérdidas son inferiores a los 3 dBm y podemos achacarlas a los conectores.

Transmisión

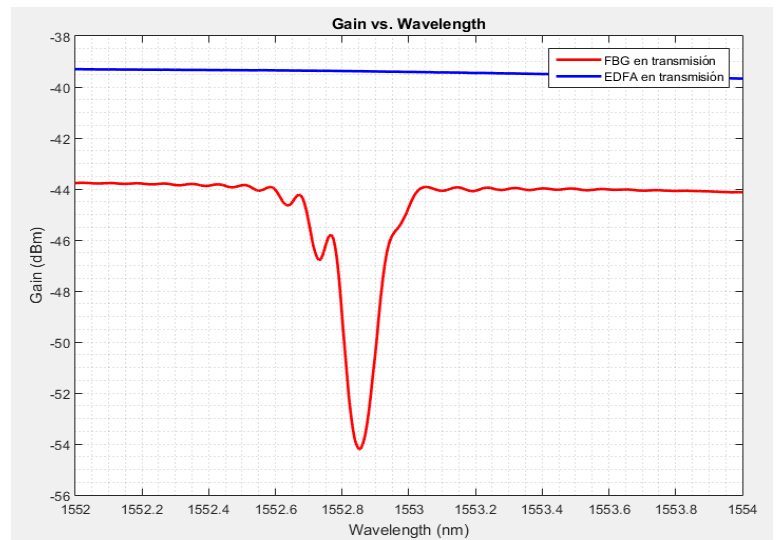
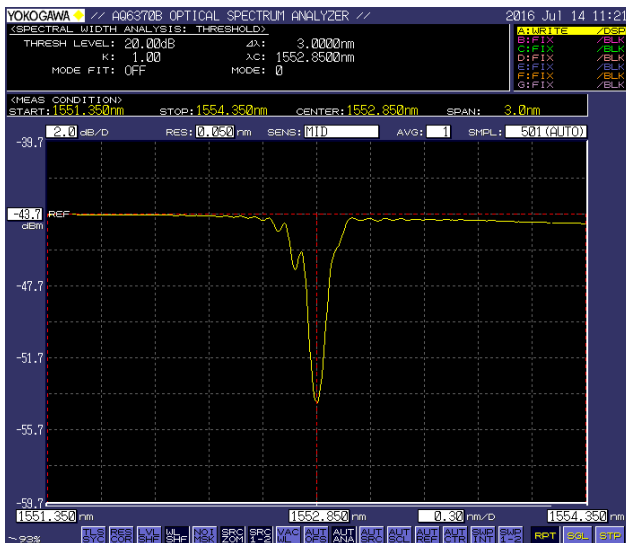


Figura 32. Recubrimiento blanco. Resultados del análisis del espectro en el OSA y en Matlab (Transmisión)

En transmisión no tenemos datos aportados por el fabricante de las fibras pero la longitud de onda de Bragg está situada en el mismo punto que en las medidas en reflexión, de lo cual deducimos que la fibra se encuentra en perfectas condiciones

Recubrimiento amarillo:

Reflexión

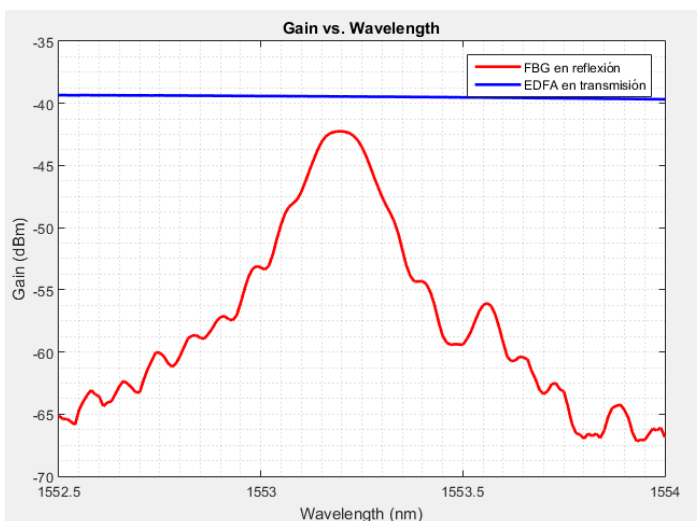
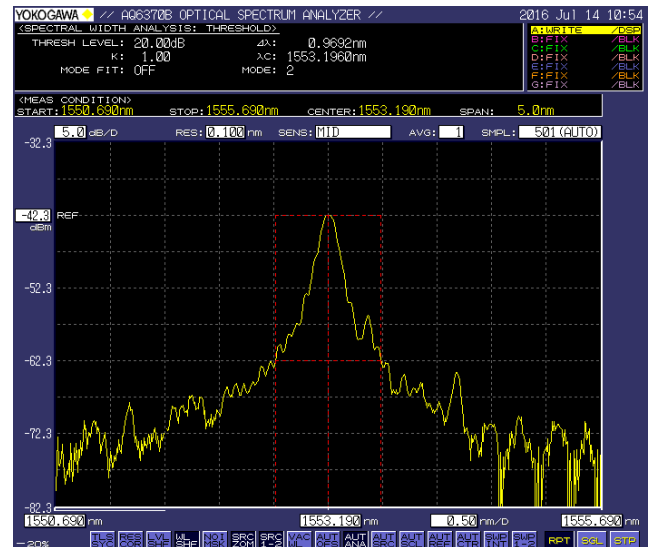
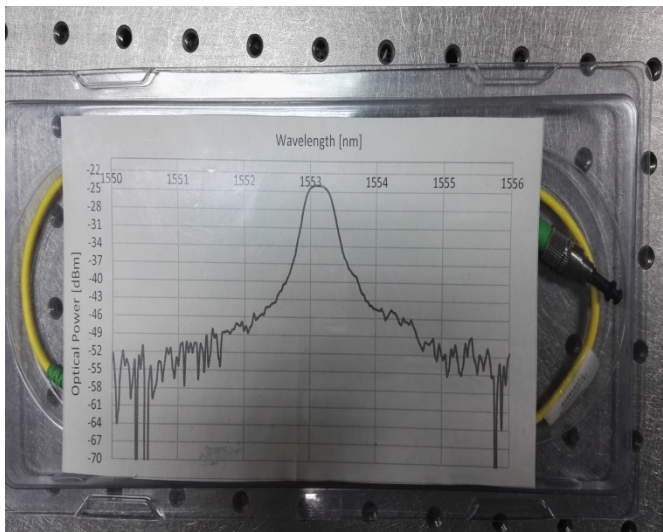


Figura 33. Datasheet de fibra con recubrimiento amarillo y resultados del análisis del espectro en el OSA y en Matlab (Reflexión)

En este caso obtenemos un resultado tal y como nos marca el fabricante, y las pérdidas entre el espectro en transmisión del EDFA y en reflexión de la FGB vuelven a ser inferiores a los 3 dBms, las achacaremos de nuevo a los conectores.

Transmisión

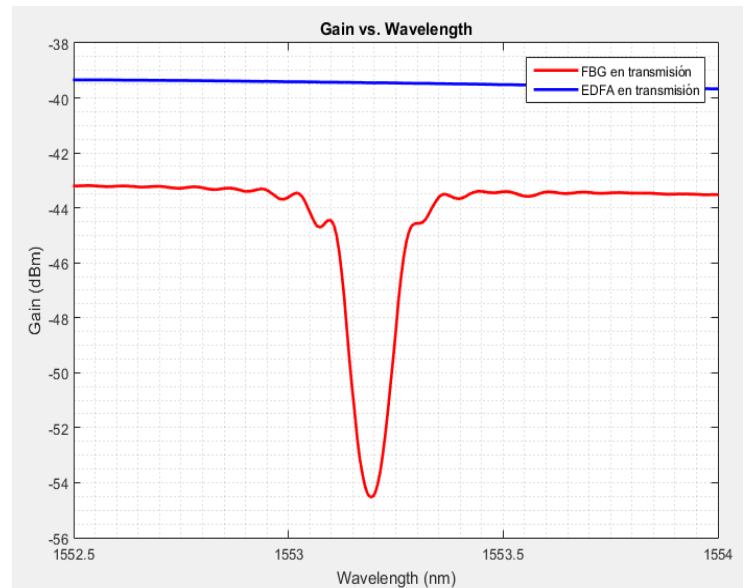
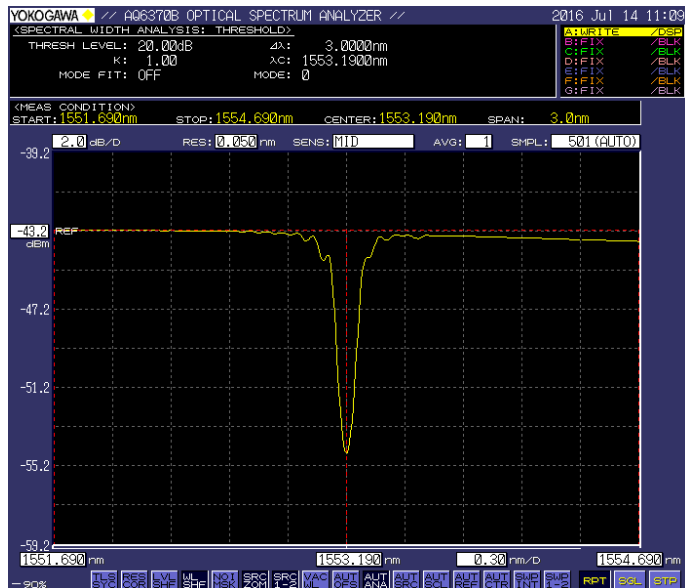


Figura 34. Recubrimiento amarillo. Resultados del análisis del espectro en el OSA y en Matlab (Transmisión)

Al igual que con la fibra anterior no tenemos datos en transmisión ya que el fabricante solo nos aporta un gráfico de la fibra en reflexión, pero la longitud de onda de Bragg sigue estando en el lugar que debería, la fibra está en perfectas condiciones.

Sin recubrimiento

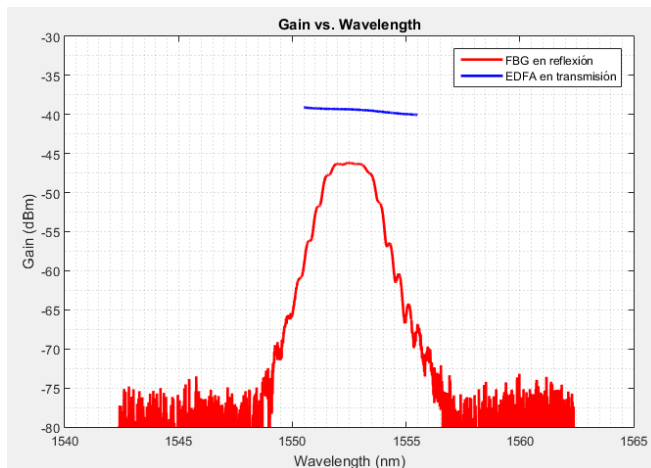
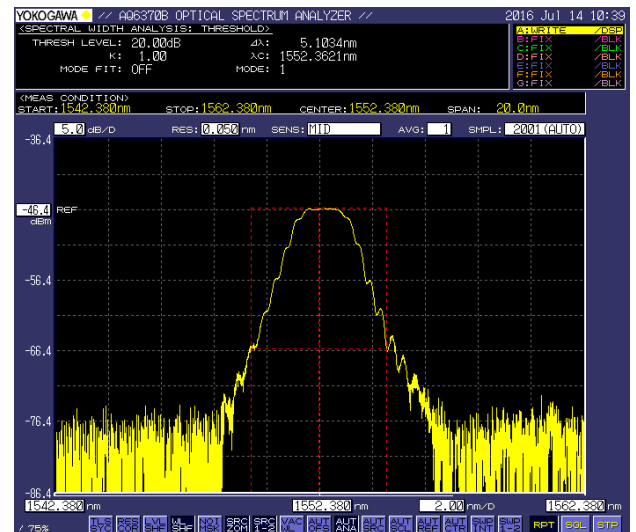
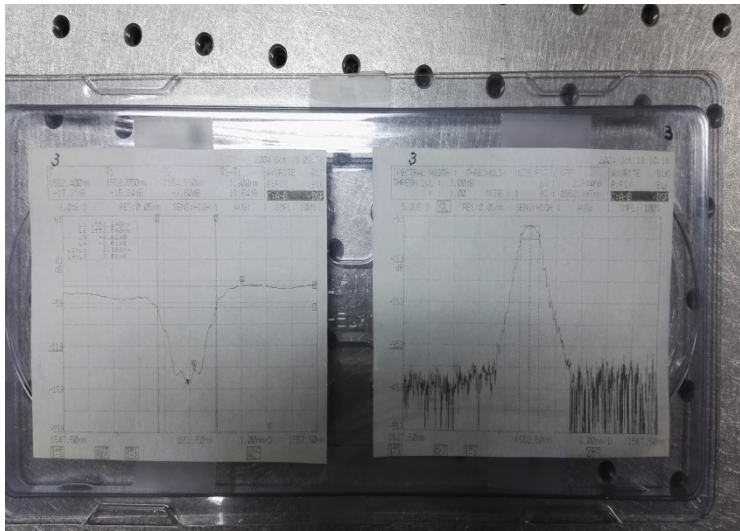


Figura 35. Datasheet de fibra sin recubrimiento y resultados del análisis del espectro en el OSA y en Matlab (Reflexión)

Transmisión

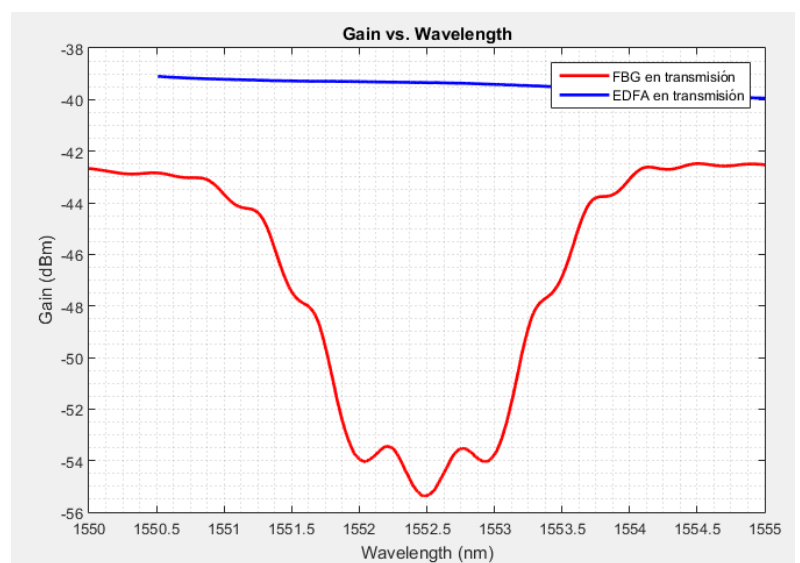
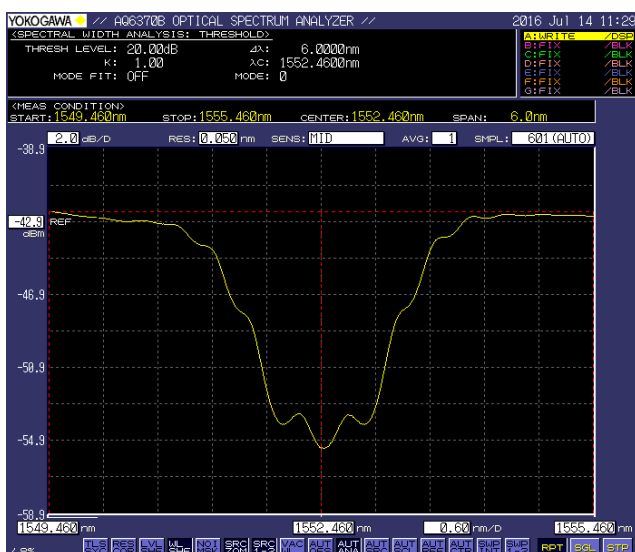


Figura 36. Sin recubrimiento. Resultados del análisis del espectro en el OSA y en Matlab (Transmisión)

CAPITULO IV – MEDIDAS EN TEMPERATURA

Medidas en temperatura

Vamos a proceder a realizar las medidas en temperatura para ver el efecto de la misma sobre la fibra y poder posteriormente suprimirlo para medir únicamente la deformación longitudinal del monolito donde van a ir montados los sensores.

Para ello hemos montado el setup mostrado en la figura 37.

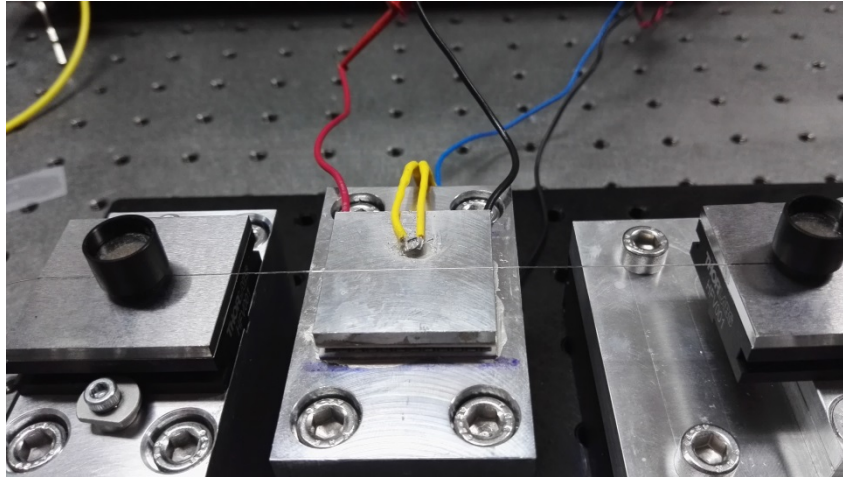


Figura 37. Foto en detalle. Fibra apoyada en superficie de aluminio, sujeta con imanes

Para realizar las pruebas en temperatura no es necesario que la fibra vaya pegada, simplemente con ir sujeta con los imanes para que pase tanto por los grooves como por la posición central de la superficie de aluminio pegada al peltier es suficiente.

Una vez que tenemos la FBG en la zona donde vamos a generar el gradiente térmico conectamos los instrumentos de la forma explicada en el apartado anterior como se muestra en la figura 38.

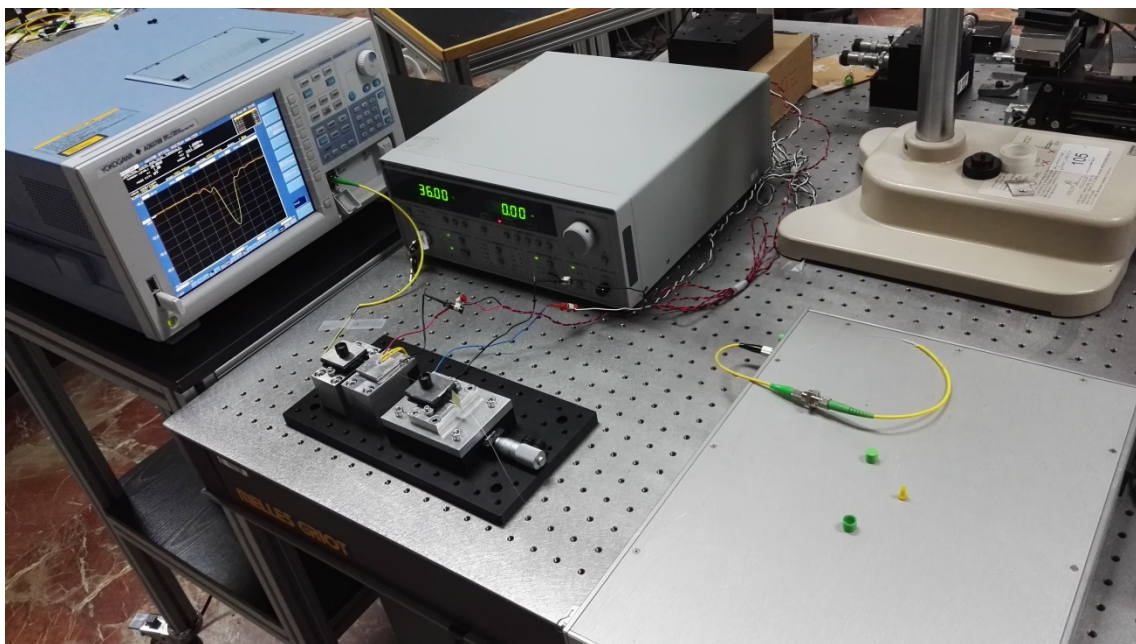


Figura 38. Setup global

Programación en Matlab

Una vez dispuesto el setup global lo que haremos será partir de la temperatura más baja e ir haciendo incrementos de 3°C desde los -10°C hasta los 50°C. Guardaremos los resultados que nos muestra el analizador de espectros ópticos en archivos de tipo .csv

Una vez tengamos todas las muestras procederemos de la siguiente manera:

```
measure_rows = 500; % tamaño las filas del archivo .csv
wavelength = NaN(measure_rows,21); % vector que almanecena las longitudes de onda de todos los archivos
gain = NaN(measure_rows,21); % vector que almacena las ganancias de todos los archivos

wavelength_eq = NaN(measure_rows,1); % vector para representar el wavelength a la temperatura de equilibrio
gain_eq = NaN(measure_rows,1); % vector para representar la ganancia a la temperatura de equilibrio

gain_min = zeros(21,1); % vector que va a almacenar el valor de ganancia mínimo
wavelength_min = NaN(21,1); % vector que va a almacenar el valor de wavelength mínimo

t = -9:3:51; % array que almacena las temperaturas de medida
t(1,21)=50;
temperature = transpose(t);
```

Figura 39. Código de programación. Variables iniciales

En primer lugar creamos una serie de vectores para almacenar los datos que hemos recogido y poder trabajar con ellos

```
file_names = char('-9°.csv','-6°.csv','-3°.csv','0°.csv'... % array que contiene los nombres de los archivos
                  , '3°.csv','6°.csv','9°.csv','12°.csv'... % donde estan las medidas de cada temperatura
                  , '15°.csv','18°.csv','21°.csv','24°.csv'...
                  , '27°.csv','30°.csv','33°.csv','36°.csv'...
                  , '39°.csv','42°.csv','45°.csv','48°.csv','50°.csv');

for i = 1:21
    data = csvread(file_names(i,:),30); % este bucle le los datos de wavelengths y gains
    for j = 1:measure_rows % y los almacena en los vectores creados
        wavelength(j,i) = data(j,1);
        gain(j,i) = data(j,2);
    end
end

for i = 1:measure_rows % este bucle le los datos de wavelengths y gains a
    wavelength_eq(i,1) = wavelength(i,12); % a la temperatura de equilibrio
    gain_eq(i,1) = gain(i,12);
end
```

Figura 40. Código de programación. Llenar variables de medidas

Ahora creamos un array de chars que contiene los nombres de los archivos .csv y con los dos bucles mostrados en la figura tal procedemos a llenarlos con los valores medidos.

```
% Representar el grating a una temperatura de equilibrio de unos 24°
figure(1);
subplot(2,1,1);
plot(wavelength_eq,gain_eq);
title('Grating a temperatura equilibrio 24°');
xlabel('Wavelength (nm)');
ylabel('Gain (dBm)');
grid minor;

% Representa el desplazamiento del gratin en función de la temperatura
subplot(2,1,2);
plot(wavelength,gain);
xlim([1552.7 1553.7]);
title('Desplazamiento del grating de -9° hasta 50° (incr +3°)');
xlabel('Wavelength (nm)');
ylabel('Gain (dBm)');
grid minor;
```

Figura 41. Código de programación. Representar gráficos de desplazamiento en temperatura

Una vez tenemos los datos almacenados simplemente tenemos que representarlos. En el primer plot representamos la longitud de onda de Bragg a la temperatura de equilibrio y en el segundo representamos todos los datos medidos a todas las temperaturas a la vez para observar el desplazamiento.

```
for i = 1:21
    gain_min(i,1) = gain(1,i);
end
for i = 1:21
    for j = 1:measure_rows
        if gain(j,i) < gain_min(i,1)
            gain_min(i,1) = gain(j,i);
            wavelength_min(i,1) = wavelength(j,i);
        end
    end
end
end
```

% en este bucle rellenamos el array de ganancias mínimas
% con valores arbitrarios para tener un valor inicial

% en este bucle recorremos el array de ganancias y vamos buscando
% el valor de ganancia mínimo y su longitud de onda para cada archivos, una vez
% encontrado lo guardamos y pasamos al siguiente archivo hasta que los tengamos todos

Figura 42. Código de programación. Buscar ganancia mínima y su longitud de onda

Ahora buscamos cada una de las medidas a las distintas temperaturas donde se encuentra el valor de ganancia mínimo y la longitud de onda a la que se produce

```
% Representación de la temperatura frente a los valores de wavelenght donde
% se encuentra el grating
figure(2);
subplot(2,1,1);
plot(temperature,wavelength_min,'r','LineWidth',2);
title('Temperatura vs. Longitud de onda');
ylabel('Wavelength (nm)');
xlabel('Temperatura (°C)');
grid minor;
```

Figura 43. Código de programación. Representar gráfico de relación entre longitud de onda y temperatura

Y finalmente lo representamos. Luego una vez representado realizamos un “fit” del mismo modo que lo hemos hecho en el capítulo III con la diferencia que ahora en lugar de ser la ecuación de Steinthart-Hart es una expresión lineal polinómica de primer grado.

```
% Creamos un modelo
y = wavelength_min;
x = temperature;
f = fittype('A*x + B'...
    , 'coefficients', {'A', 'B'});
% Ajuste
t = fit(x, y, f, 'StartPoint', [9E-03, 1553]);
subplot(2,1,2);
plot(t, x, y);
ylabel('Wavelength (nm)');
xlabel('Temperatura (°C)');
grid minor;
display(t);
```

Figura 44. Código de programación. Ajuste mínimos cuadrados

Y con esto ya tenemos el ajuste mínimos cuadrados de los resultados obtenidos y tenemos calculado el coeficiente que nos da el desplazamiento por grado con un intervalo de confianza del 95%

Medidas en transmisión

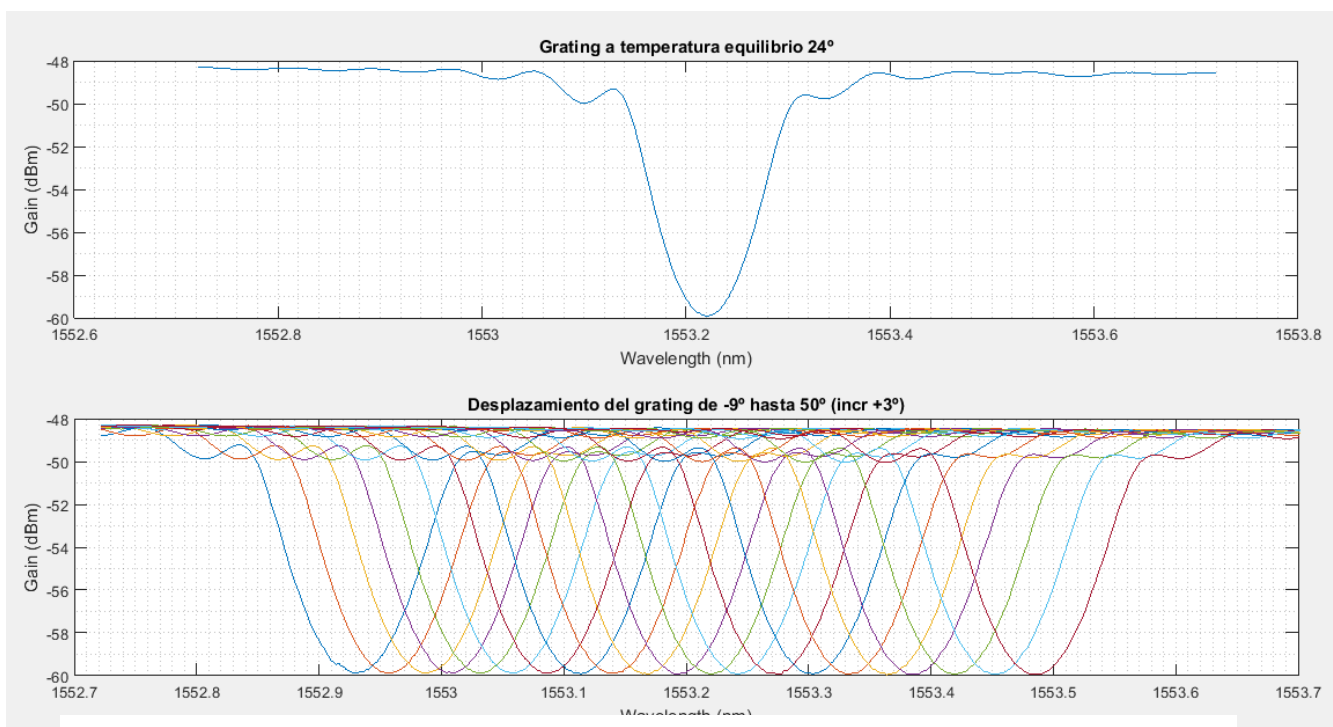


Figura 45. Longitud de onda de Bragg a la temperatura de equilibrio y desplazamiento de la longitud de onda en función de la temperatura. Ciclo 1 (Transmisión)

En la figura 45 en el gráfico superior mostramos a qué longitud de onda se encuentra la longitud de onda de Bragg a la temperatura de equilibrio y en el gráfico de abajo mostramos su desplazamiento en todo el rango de trabajo.

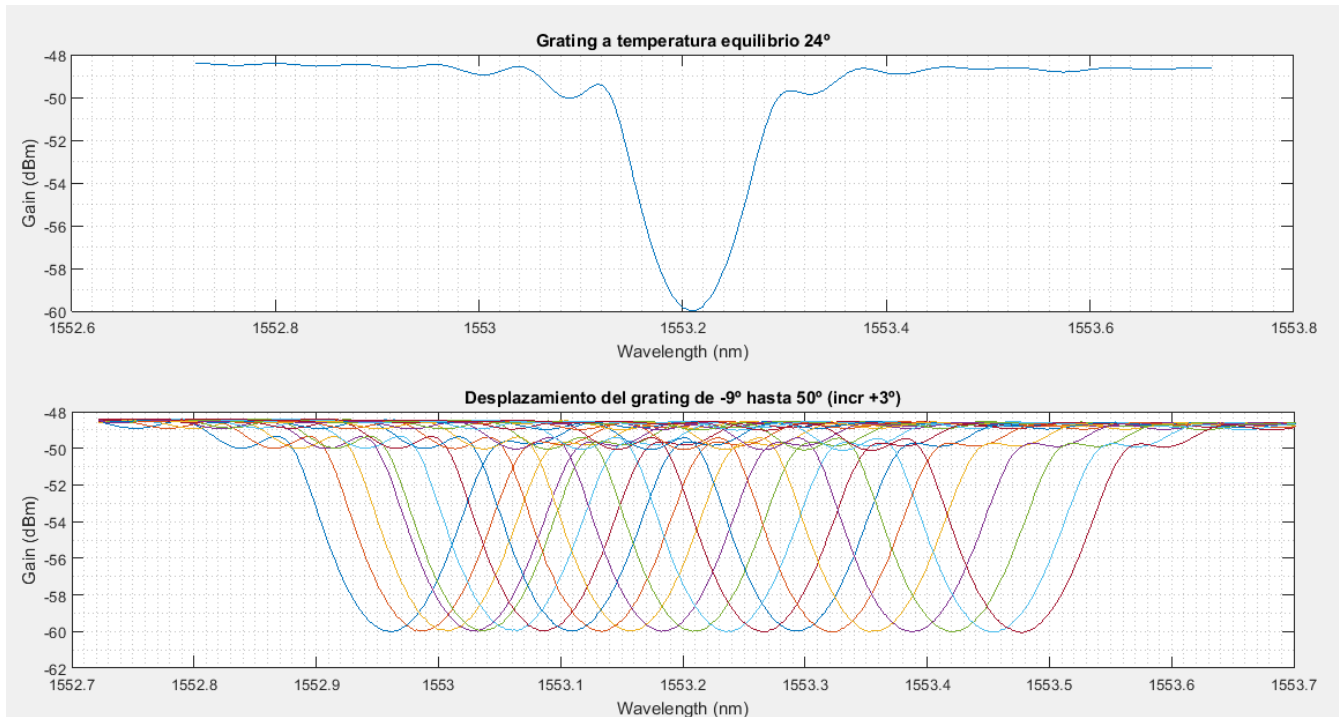


Figura 46. Longitud de onda de Bragg a la temperatura de equilibrio y desplazamiento de la longitud de onda en función de la temperatura. Ciclo 2 (Transmisión)

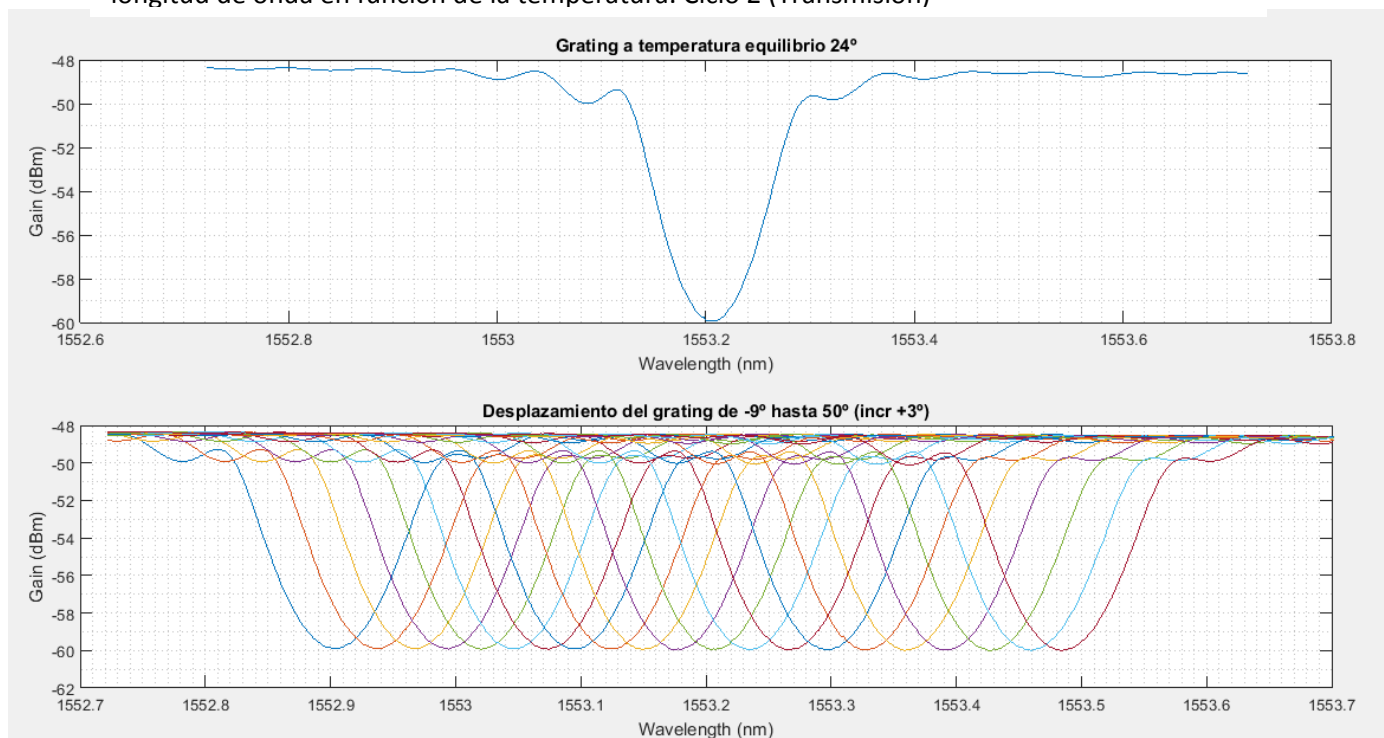


Figura 47. Longitud de onda de Bragg a la temperatura de equilibrio y desplazamiento de la longitud de onda en función de la temperatura. Ciclo 3 (Transmisión)

Ajuste mínimos cuadrados

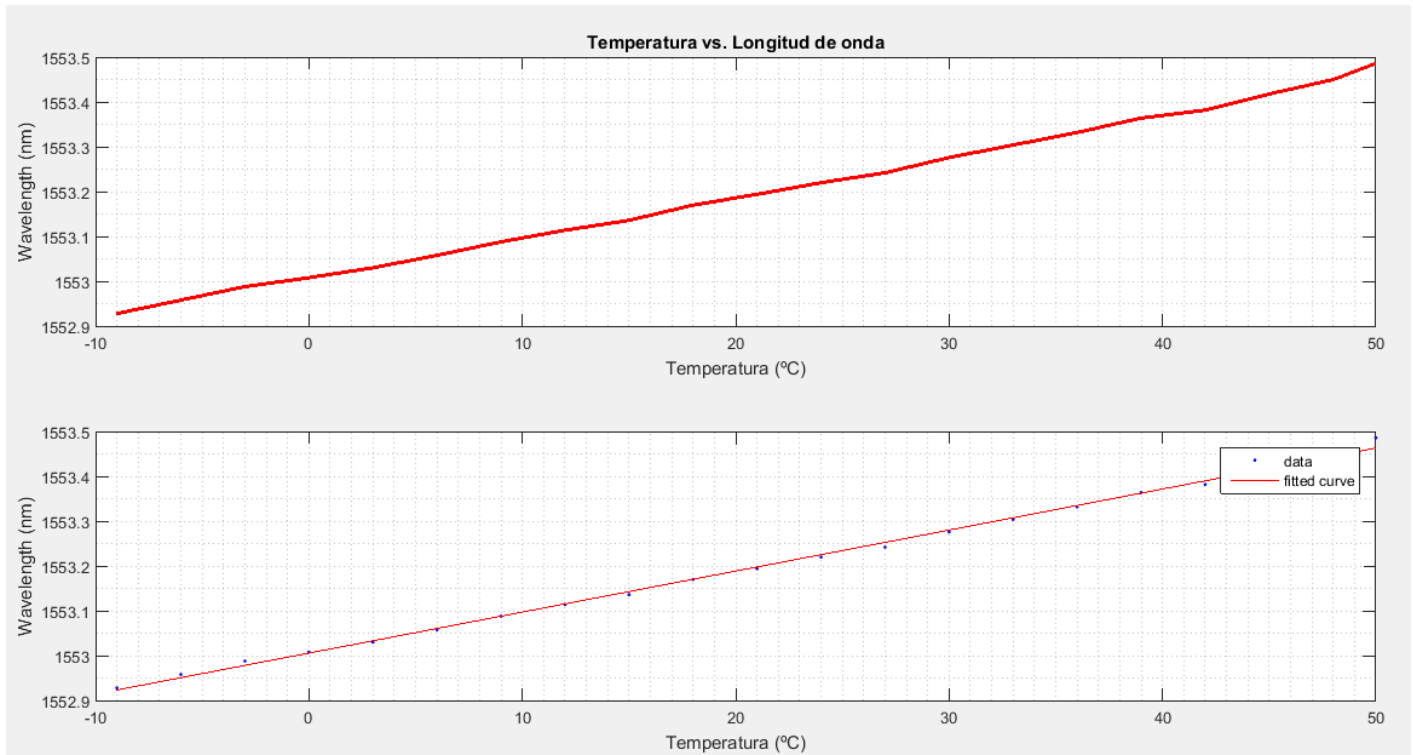


Figura 48. Gráfica desplazamiento de longitud de onda de Bragg en función de la temperatura. Ciclo 1 (Transmisión)

Una vez tengamos el gráfico observamos el ajuste que nos realiza Matlab.

Si nos fijamos en los datos experimentales del gráfico superior de la figura tal podemos apreciar una respuesta lineal al incremento y decremento en temperatura en la longitud de onda de Bragg. En el gráfico inferior de la figura 48 mostramos el ajuste que nos realiza Matlab y en la figura 49 los coeficientes de la expresión lineal

```
t =

General model:
t(x) = A*x + B
Coefficients (with 95% confidence bounds):
A = 0.00915 (0.008962, 0.009338)
B = 1553 (1553, 1553)
```

Figura 49. Calculo de coeficientes de la expresión lineal. Ciclo 1 (Transmisión)

Obtenemos que el desplazamiento por grado es de $9'15 \cdot 10^{-3}$ nm por cada grado centígrado.

Vamos a ver los resultados que obtenemos en los otros dos ciclos que hemos realizado y los mostraremos en las figuras 50 y 52:

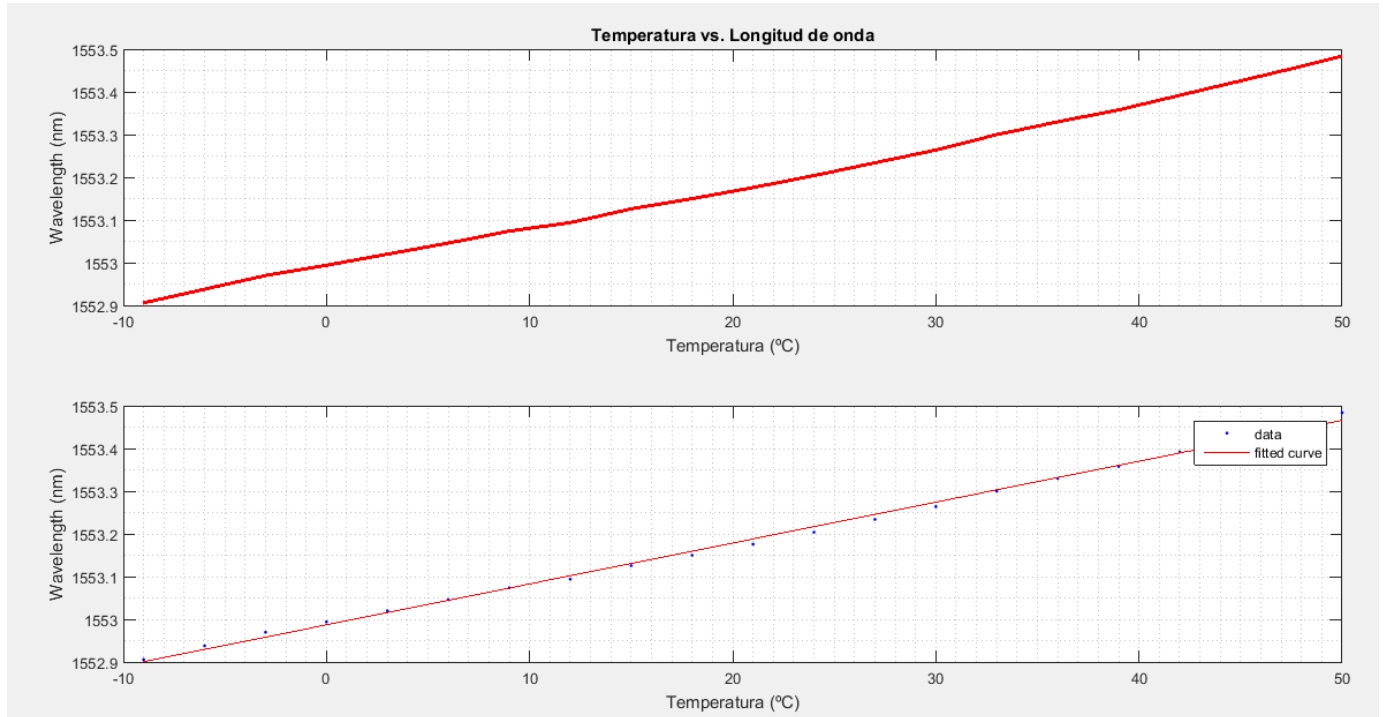


Figura 50. Gráfica desplazamiento de longitud de onda de Bragg en función de la temperatura. Ciclo 2 (Transmisión)

```
t =

General model:
t(x) = A*x + B
Coefficients (with 95% confidence bounds):
A = 0.009582 (0.009348, 0.009815)
B = 1553 (1553, 1553)
```

Figura 51. Calculo de coeficientes de la expresión lineal. Ciclo 2 (Transmisión)

En este caso seguimos obteniendo una respuesta lineal salvo que en este caso hemos obtenido que el desplazamiento por grado es de $9'58 \cdot 10^{-3} \text{ nm}$

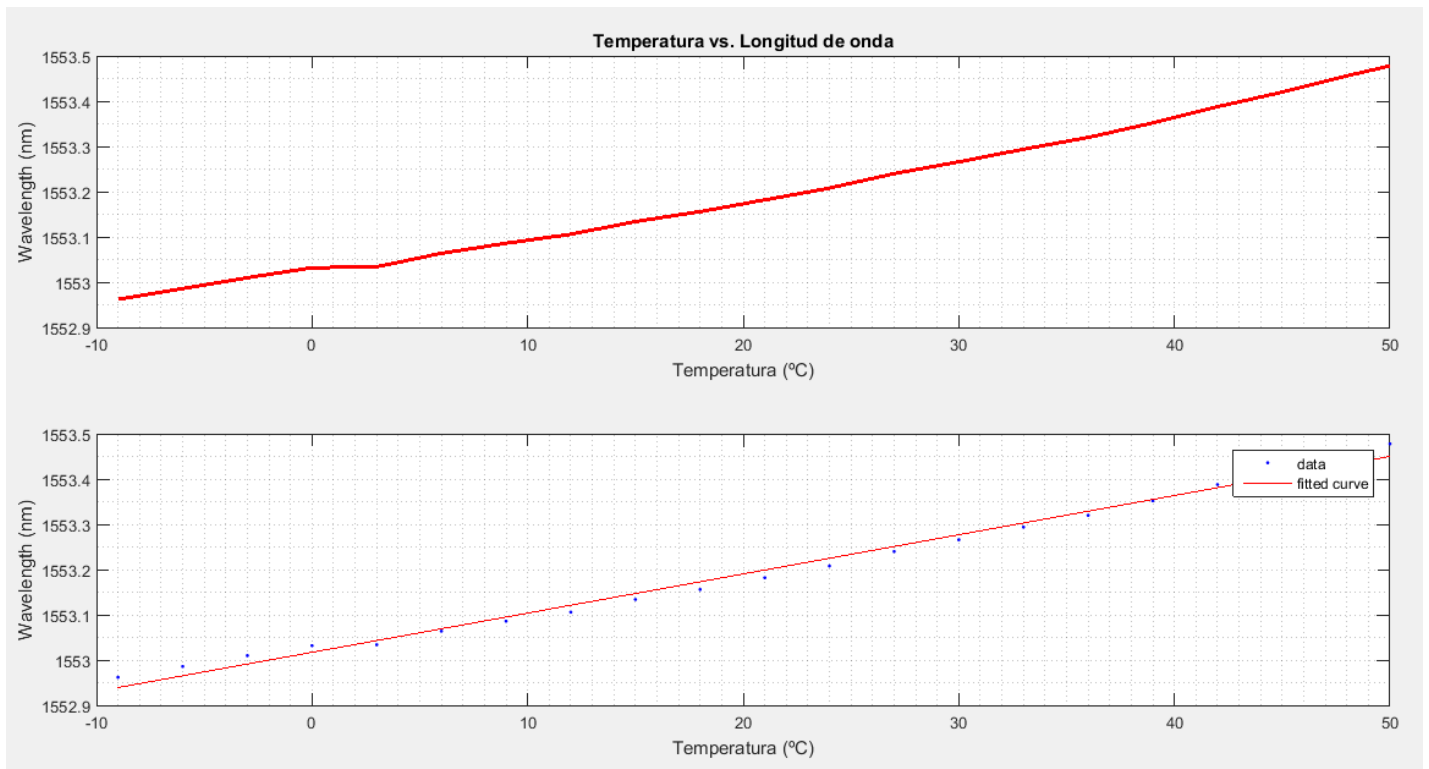


Figura 52. Gráfica desplazamiento de longitud de onda de Bragg en función de la temperatura. Ciclo 3 (Transmisión)

$t =$

```
General model:
t(x) = A*x + B
Coefficients (with 95% confidence bounds):
A = 0.008659 (0.008253, 0.009066)
B = 1553 (1553, 1553)
```

Figura 53. Calculo de coeficientes de la expresión lineal. Ciclo 3 (Transmisión) (Transmisión)

En el último ciclo en transmisión obtenemos que el desplazamiento por grado es de $8'65 \cdot 10^{-3}$ nm

En los tres ciclos obtenemos una respuesta completamente lineal y el desplazamiento por grado está dentro del siguiente intervalo $[8'65 \cdot 10^{-3}, 9'58 \cdot 10^{-3}]$ nm. Por tanto podemos considerar los resultados bastante aceptables

Medidas en reflexión

A continuación vamos a realizar lo mismo que hemos realizado en el apartado anterior solo que esta vez vamos a medir en reflexión valiéndonos del circulador óptico de 1500 nm.

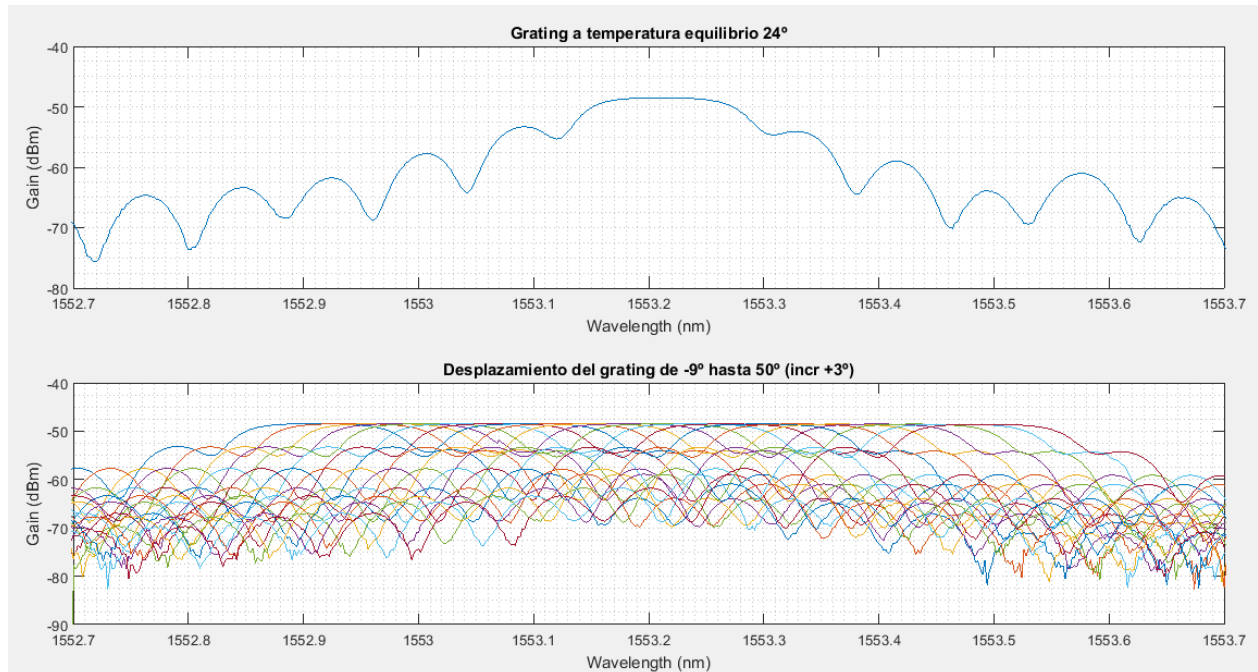


Figura 54. Longitud de onda de Bragg a la temperatura de equilibrio y desplazamiento de la longitud de onda en función de la temperatura. Ciclo 1 (Reflexión)

Como podemos observar en el gráfico inferior de la figura 54, al igual que en transmisión vemos claramente que se produce un desplazamiento cuando variamos la temperatura.

Vamos a realizar un par más de ciclos de subida y bajada en el rango de temperaturas y comprobar los resultados obtenidos.

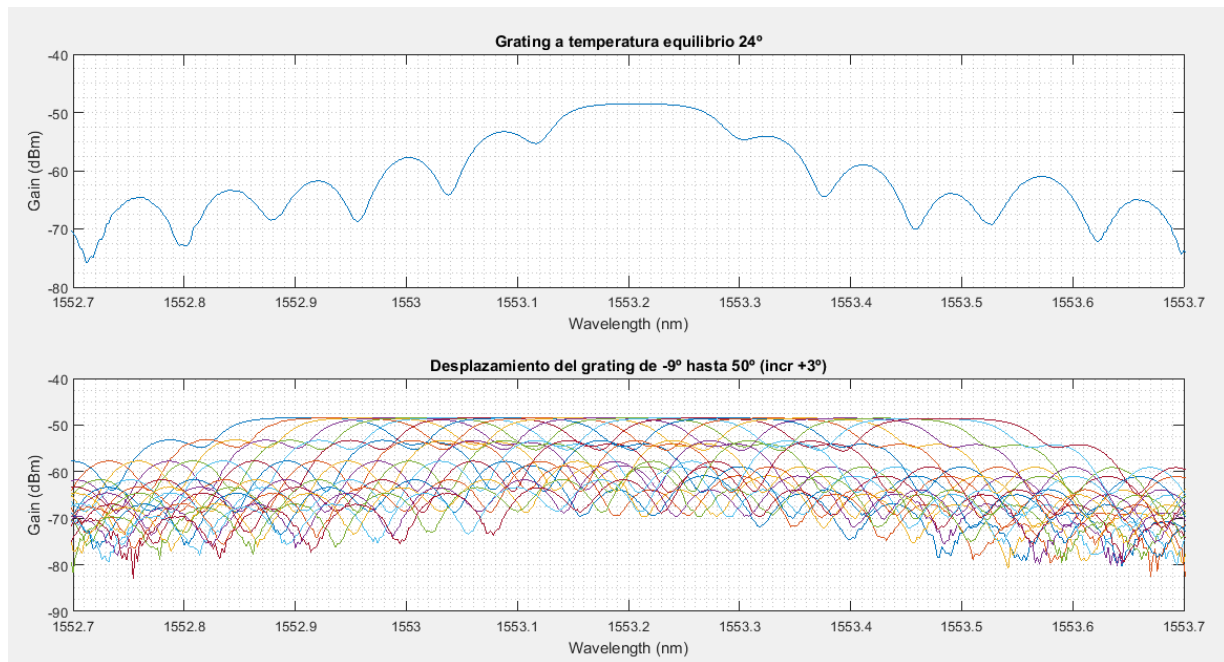


Figura 55. Longitud de onda de Bragg a la temperatura de equilibrio y desplazamiento de la longitud de onda en función de la temperatura. Ciclo 2 (Reflexión)

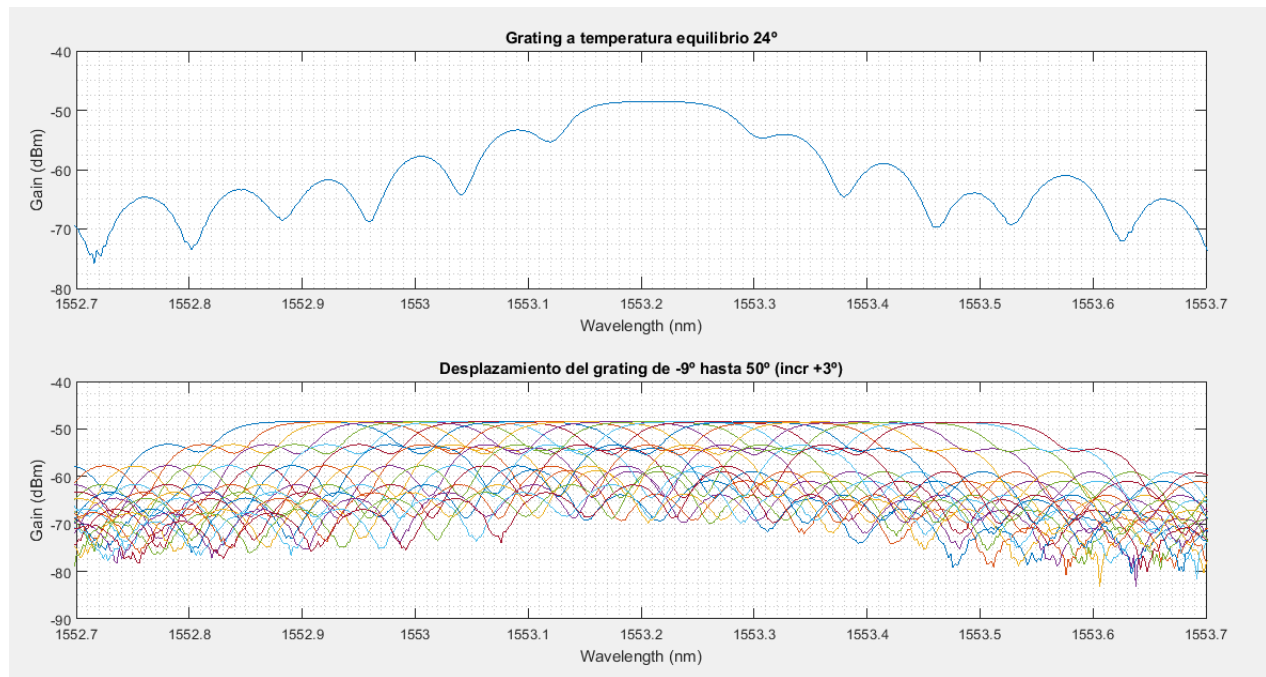


Figura 56. Longitud de onda de Bragg a la temperatura de equilibrio y desplazamiento de la longitud de onda en función de la temperatura. Ciclo 3 (Reflexión)

Como podemos observar en los tres ciclos medidos los resultados salen bastante similares entre sí y también guardan bastante similitud con los resultados obtenidos de las medidas en transmisión.

Vamos a comprobar ahora el desplazamiento por grado de la misma forma en la que lo hemos comprobado en transmisión, con la salvedad de que ahora la función que hemos implementado en Matlab va a buscar el valor de ganancia máximo y a qué longitud de onda se encuentra.

Ajuste mínimos cuadrados

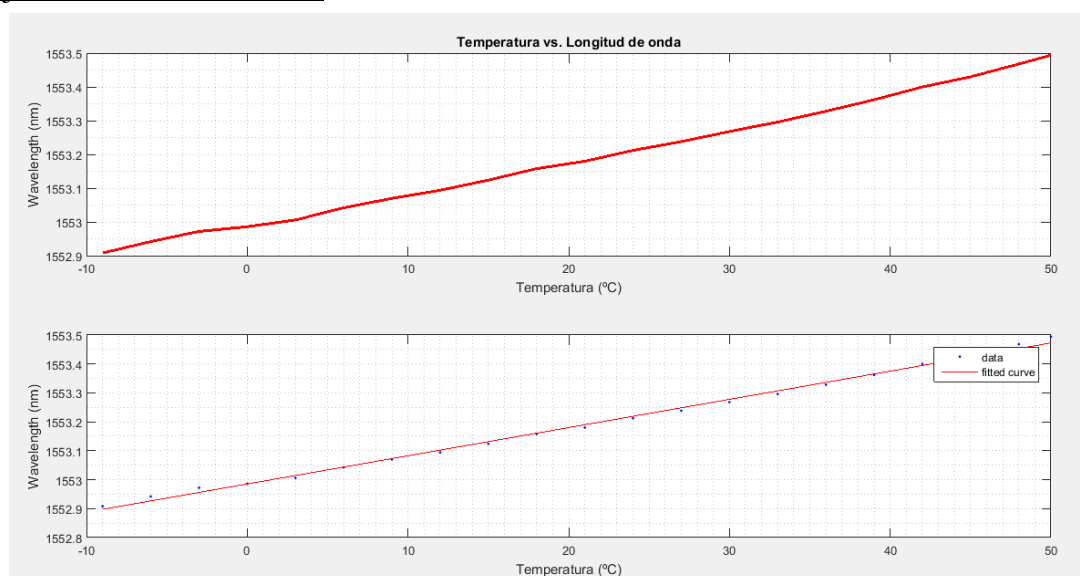


Figura 57. Gráfica desplazamiento de longitud de onda de Bragg en función de la temperatura. Ciclo 1 (Reflexión)

$t =$

```
General model:
t(x) = A*x + B
Coefficients (with 95% confidence bounds):
A = 0.009749 (0.009483, 0.01001)
B = 1553 (1553, 1553)
```

Figura 58. Calculo de coeficientes de la expresión lineal. Ciclo 1 (Reflexión)

El coeficiente de la expresión lineal en este caso es de $9'74 \cdot 10^{-3}$ nm por cada grado centígrado

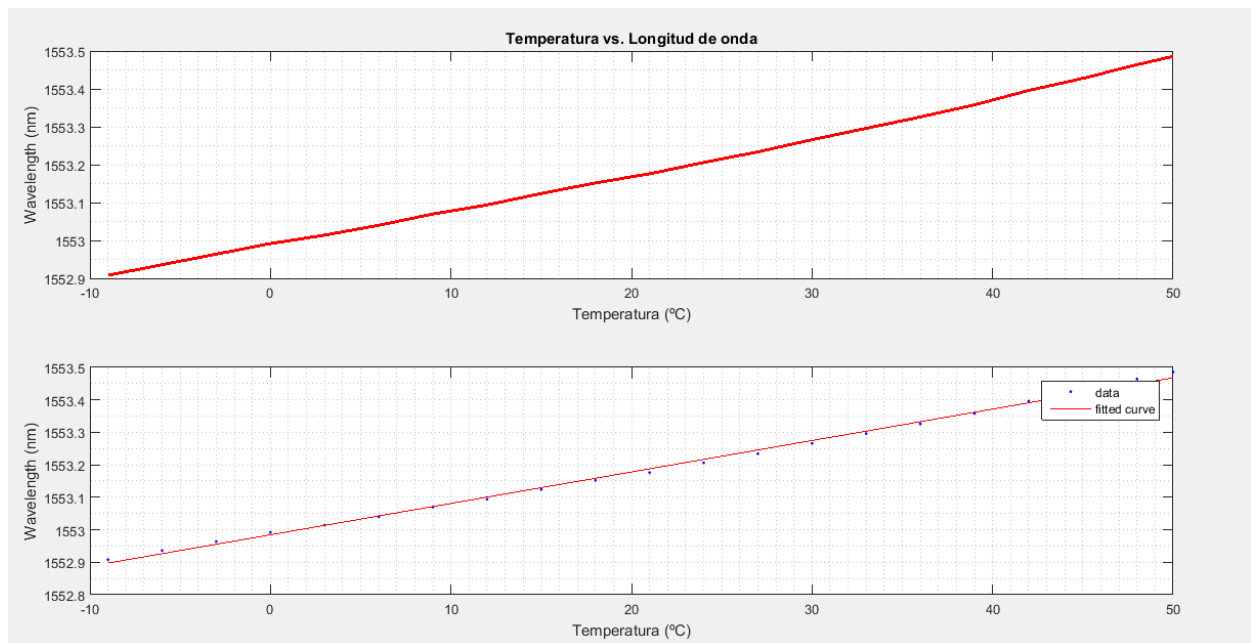


Figura 59. Gráfica desplazamiento de longitud de onda de Bragg en función de la temperatura. Ciclo 2 (Reflexión)

$t =$

```
General model:
t(x) = A*x + B
Coefficients (with 95% confidence bounds):
A = 0.009676 (0.009438, 0.009913)
B = 1553 (1553, 1553)
```

Figura 60. Calculo de coeficientes de la expresión lineal. Ciclo 2 (Reflexión)

El coeficiente de la expresión lineal en este caso es de $9'67 \cdot 10^{-3}$ nm por cada grado centígrado

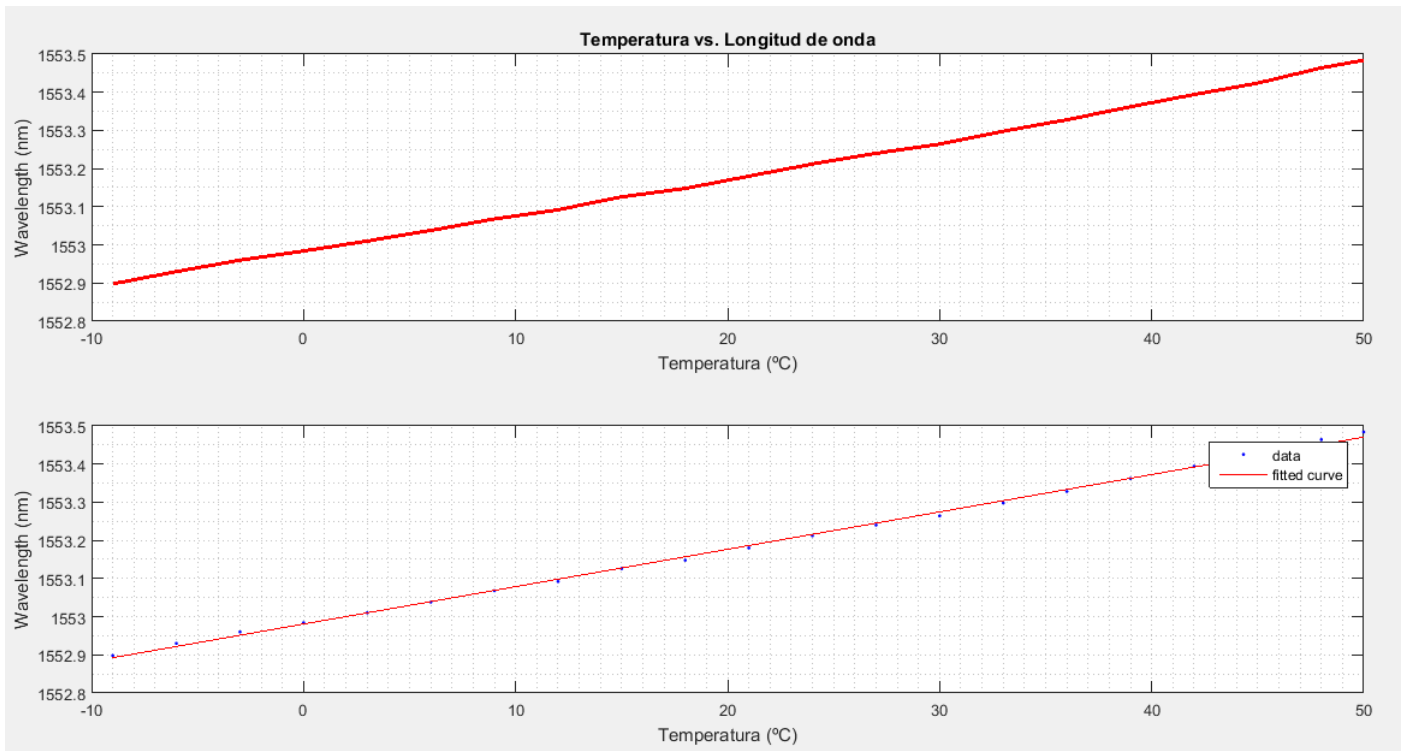


Figura 61. Gráfica desplazamiento de longitud de onda de Bragg en función de la temperatura. Ciclo 3 (Reflexión)

General model:
 $t(x) = A \cdot x + B$
 Coefficients (with 95% confidence bounds):
 A = 0.009797 (0.00962, 0.009974)
 B = 1553 (1553, 1553)

Figura 62. Calculo de coeficientes de la expresión lineal. Ciclo 3 (Reflexión)

El coeficiente de la expresión lineal en este caso es de $9.79 \cdot 10^{-3}$ nm por cada grado centígrado

Si nos fijamos en las medidas en reflexión, el desplazamiento por grado sale mucho más preciso que en las medidas en transmisión. Está dentro del intervalo $[9.67 \cdot 10^{-3}, 9.79 \cdot 10^{-3}]$ nm.

Si recordamos el primer bloque en el que hemos explicado los fundamentos teóricos de las redes de Bragg en fibra, para una fibra en la que la longitud de onda de Bragg se encuentra en torno a los 1500 nm nos decían que el desplazamiento por grado era de $9.8 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ por tanto podemos calificar los resultados obtenidos como bastante adecuados.

Factores externos a al FBG

En este apartado vamos a ver la influencia que tienen los factores ajenos a la fibra y la importancia de que la FBG este aislada para no perturbar las medidas

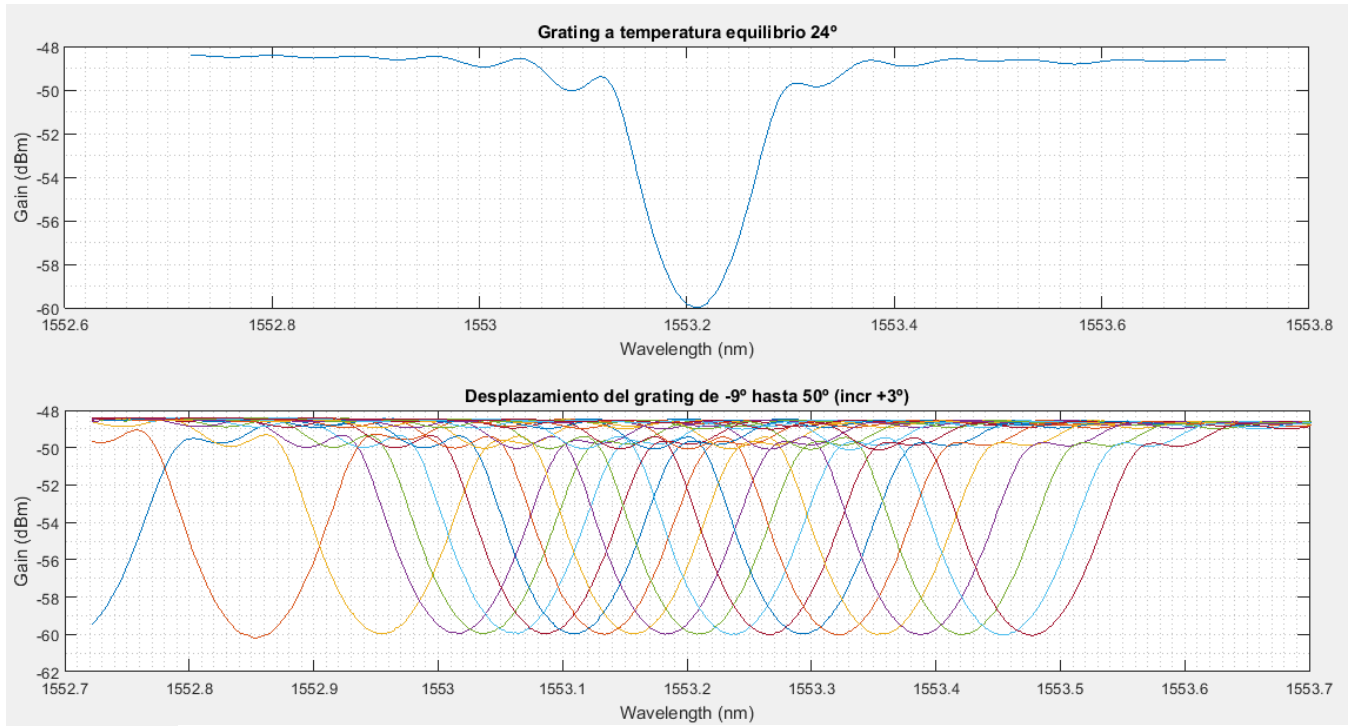


Figura 63. Longitud de onda de Bragg a la temperatura de equilibrio y desplazamiento de la longitud de onda en función de la temperatura. Medidas con hielo (Transmisión)

Como podemos observar en la figura 63 ha habido un sobredesplazamiento en las tres primeras medidas: -9°C , -6°C y -3°C . ¿A qué es esto debido?

En esta medida extra que tomamos, cuando llevamos la superficie en la que estaba apoyada la fibra desde la temperatura de equilibrio hasta los -9°C , la superficie estaba cubierta por una cantidad de agua considerable de una prueba previa. Al llevar la superficie hasta esta temperatura la fibra se “sumergió” en el agua que había encima y posteriormente se solidificó encima de ella formando una pequeña capa de escarcha que estaba ejerciendo presión sobre el FBG.

Esta presión hizo que las medidas a temperaturas bajo cero se vieran comprometidas y que los resultados distaran mucho del comportamiento que podemos considerar normal.

Ya que si nos fijamos en la figura 63 una vez atravesamos la barrera de los 0°C el desplazamiento vuelve a actuar con normalidad asemejándose a las medidas anteriores.

Esto provoca que la respuesta en temperatura ya no sea lineal en todo el rango.

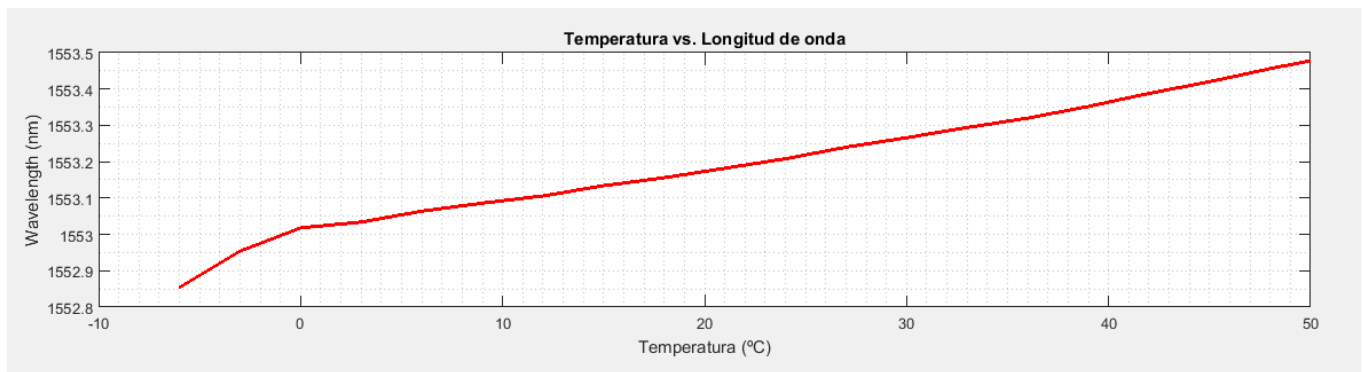


Figura 64. Gráfica desplazamiento de longitud de onda de Bragg en función de la temperatura. Medidas con hielo (Transmisión)

Como vemos en la figura 64, en el tramo de -9°C a 0°C observamos un comportamiento anómalo debido al efecto del hielo presionando la FBG.

Este comportamiento nos sugiere que la fibra tiene que estar lo más aislada posible ya que una cantidad pequeña de hielo presionando la FBG provoca grandes perturbaciones en las medidas.

Otro aspecto importante a tener en cuenta es el efecto del aire sobre la FBG. Al realizar las medidas observamos que el hecho de estar respirando a una distancia corta de la FBG hacia que la longitud de onda oscilara acorde a las respiraciones.

Por tanto, si en un futuro este diseño va a estar implementado al aire libre hay que tener muy en cuenta que la zona donde se encuentre la FBG tiene que estar completamente aislada tanto de la entrada de agua como del aire.

CAPÍTULO V – PRUEBAS DE PEGADO

Pruebas de pegado

Por el momento no hemos realizado ninguna prueba en deformación debido a la escasez de fibras en el experimento y el poco tiempo con el que contamos. Sin embargo hemos realizado algo previo a las pruebas en deformación y de máxima importancia como son las pruebas de pegado.

Para poder realizar unas buenas medidas en deformación la fibra tiene que estar bien pegada a la superficie, tenemos que evaluar si con pegar los extremos de esta es suficiente o si hay que pegar también la FGB, si el tipo de pegamento va a dañar o no la fibra, la facilidad con la que podemos retirar el adhesivo...etc.

Todos estos factores van a tener una gran relevancia, ya que si no los tenemos en cuenta nuestras medidas pueden verse comprometidas.

Para realizar estas pruebas nos hemos valido de 4 materiales distintos: Celo 3M, Cinta americana, Norland Optical Adhesive 61 y Loctite. Vamos a evaluar las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos para extraer conclusiones

CELO 3M

Ventajas

- Se quita y pone con facilidad
- Deja una cantidad ínfima residuo adhesivo
- Fácilmente manipulable
- El tiempo de pegado es instantáneo

Inconvenientes

- Aporta muy poca sujeción
- Con poca tensión la fibra resbala por la superficie



Figura 65. Celo 3M

CINTA AMERICANA

Ventajas

- Se quita y pone con facilidad
- Deja poca cantidad de residuo adhesivo
- Fácilmente manipulable
- El tiempo de pegado es instantáneo



Figura 66. Cinta Americana

Inconvenientes

- Aporta más sujeción que el celo pero igualmente insuficiente
- Con poca tensión la fibra resbala por la superficie

NORLAND OPTICAL ADHESIVE 61

Ventajas

- Aporta muy buena sujeción a la fibra
- Se quita con facilidad de la superficie
- El tiempo de curado con LED ultravioleta es muy poco



Figura 67. Norland Optical Adhesive 61

Inconvenientes

- Hay que cubrir prácticamente todo el groove para que aporte la sujeción deseada
- Al llegar a un cierto nivel de tensión el adhesivo se levanta de la superficie de aluminio
- La acetona no lo disuelve y su retirada de la fibra es bastante delicada y peligrosa
- Hay que aplicarlo en la fibra desnuda ya que si se echa sobre el recubrimiento acrílico, la fibra resbala por él formando una especie de túnel
- Para poder retirarlo hay que usar otro tipo de disolvente más fuerte que podría dañar la fibra

LOCTITE

Ventajas

- Es el que mejor sujeción aporta
- Se adhiere muy bien a la superficie
- Se disuelve con acetona
- El tiempo de curado es muy poco



Figura 68. Loctite

Inconvenientes

- Disuelve el recubrimiento acrílico de la fibra dejándola al descubierto y vulnerable
- Deja mucho residuo en la superficie a la que se adhiere
- Si no se aplica en la fibra desnuda resbala por el recubrimiento acrílico formando una especie de túnel.

Conclusiones

CONSIDERACIONES: Hay que tener en cuenta que la deformación que va a experimentar la fibra va a ser un 1% de la distancia entre los puntos de sujeción, nuestra distancia de sujeción es de 75 mm pero será un factor a tener en cuenta en la futura implementación.

De las pruebas de pegado hechas en las condiciones mencionadas podemos extraer lo siguiente:

Si la fibra se va a dejar fija:

La mejor solución es aplicar Loctite ya que es el que mejor sujeción aporta y sus inconvenientes son a la hora de retirarlo; por tanto si no se va a retirar sería la mejor solución siempre y cuando lo apliquemos en la fibra desnuda en los puntos de sujeción para que no resbale.

Si la fibra se va a estar manipulando:

En el caso de que haya que estar quitando y poniendo las fibras, la mejor solución sería pensar algún tipo de montaje que permita acoplar “clamps”. De este modo evitaríamos todos los problemas de retiro del material; aunque habría que evaluar cuanta sujeción aportaría y en qué punto comenzaría a resbalar.

PRESUPUESTO

Thorlabs

Line	Item Number	Description	Quantity	Price Each	Amount
1	PT1/M	Metric Single Axis Translation Stage	1	244,80 €	244,80 €
2	Commodity: 8479 8997 MB1530F/M	Aluminium Breadboard 150mm x 300mm x M6 Taps	1	76,50 €	76,50 €
3	Commodity: 7616 9990 HW-KIT2/M	M6 bolt kit over 1000 pieces	1	98,10 €	98,10 €
4	Commodity: 7318 1561 PM16-122	USB Power Meter, Germanium Sensor 50mW	1	779,40 €	779,40 €
5	HFV001	Standard V-Groove Fiber holder for Multi-Axis Stages	2	119,70 €	239,40 €
TOTAL THORLABS					1.438,20 €

Oficina técnica

Line	Item Number	Description	Quantity	Price Each	Amount
1	9999	TROZO ALUMINIO 80X12X500 MM CALIDAD 7075	1	31,00 €	31,00 €
2	9999	TROZO ALUMINIO 80X50X500 MM CALIDAD 7075	1	117,00 €	117,00 €
3	9999	MTS PLETINA ALUMINIO 50X5 MM	6	19,10 €	114,60 €
TOTAL BRUTO					262,60 €
TOTAL OFICINA (21% IVA)					317,75 €

Sumando del pedido a Thorlabs más el pedido a la oficina técnica hacen un total:

PRESUPUESTO TOTAL: 1.755,95 €

BIBLIOGRAFÍA

[1] - Coldren, L. A.; Corzine, S. W.; Mashanovitch M.L. (2012): “Mirrors and resonators for diode lasers”. En *Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits* (pp. 91-156). Willey

[2] - Wikipedia.org (2016): *Ley de Bragg*. Consultado durante el mes de julio en Wikipedia
https://es.m.wikipedia.org/wiki/Ley_de_Bragg

[3] - HBM (2016): *¿Qué es una red de Bragg en fibra?* Consultado durante el mes de julio en Hbm.com.
<https://www.hbm.com/es/4596/que-es-una-red-de-bragg-en-fibra/>

{4} - Mathworks.com (2016): *MATLAB Examples - MATLAB & Simulink*. Consultado durante el mes de julio en Mathworks
<http://es.mathworks.com/help/matlab/examples.html?requestedDomain=es.mathworks.com>